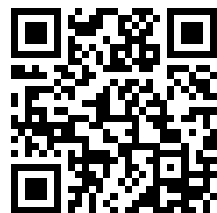


---

This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google<sup>TM</sup> books

<https://books.google.com>





## A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

## Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

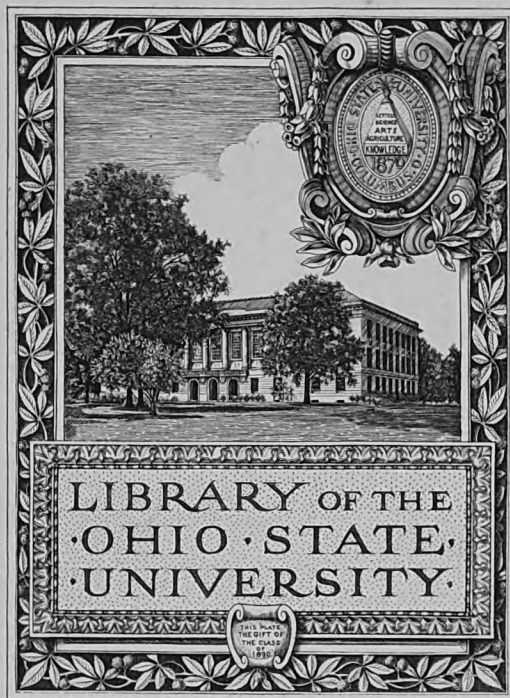
- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

## À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>







F. E. French Del 1915.

A. N. Macdonald Sc









71-2

BULLETIN  
DE LA  
SOCIÉTÉ FRANÇAISE  
DES  
ÉLECTRICIENS





BULLETIN  
DE LA  
SOCIÉTÉ FRANÇAISE  
DES  
ÉLECTRICIENS

RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE LE 7 DÉCEMBRE 1886

QUATRIÈME SÉRIE  
TOME X — ANNÉE 1930



PARIS  
ROGER BOSSÉ, ÉDITEUR  
12, RUE BACHAUMONT

—  
1930

OHIO STATE  
UNIVERSITY

TK R

500

Sec. 4

v. 10, pt. 1

STATE OF OHIO

WITNESSETH

**BULLETIN**  
DE LA  
**SOCIÉTÉ FRANÇAISE**  
DES  
**ÉLECTRICIENS**

---

**SOMMAIRE**

---

**COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :**

Réunion ordinaire mensuelle du samedi 7 décembre 1929, p. 6,  
Admissions des Membres titulaires, p. 6.  
Nécrologie, p. 7.  
Dons à la Société, p. 7.

**COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :**

Considérations sur les Industries électrochimiques et électrométallurgiques françaises, (M. P. BUNET), p. 9. — Usines hydroélectriques et lignes à 220 V aux États-Unis, (M. DUVAL), p. 29. — Formule simple permettant dans tous les cas le calcul rapide des résistances ohmiques en courant alternatif, (M.-A. LEVASSEUR), p. 73. — Sur l'emploi des relais d'indépendance pour la protection des lignes aériennes contre les mises à la terre, (M. FALLOU), p. 82.

**TRAVAUX DES SECTIONS**

Sommaire : p. 95. — Texte : p. 95.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 108.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 109.

IL Y A TRENTE ANS, p. 112.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le **BULLETIN** est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.  
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4<sup>e</sup> série, tome X, n° 101.

# COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

## RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 7 Décembre 1929

Présidence de M. BUNET.

La séance est ouverte à 16 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admissions suivantes :

**Aubouin** (Maurice, Georges), ingénieur du génie Rural, Elève officier de réserve à Versailles (Génie), 19, avenue du Maine, à Paris (14<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Bellot** (Louis-Désiré-Félix), ingénieur aux Etablissements Schneider et Cie, 10, rue des Pavillons, à Paris (20<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Rey.

**Bourla** (Paul-Grégoire), ingénieur à la Société des Forces Motrices de la Truyère, 12, rue de la Préfecture, à Saint-Etienne (Loire). — Présenté par MM. Swynge-dauw et J. Blondin.

**Chapouthier** (Paul-Jean-Pierre), ingénieur des Ponts et Chaussées en congé H. C., attaché à la direction du Nord-Lumière, 3, rue de Messine, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Girousse et Daguerre.

**Claïsse** (René-Jean), militaire, 2, rue des Ateliers, à La Mulatière (Rhône). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Herzig** (Emeric-René-Maurice), ingénieur électricien, actuellement aux Acières Réunies de Burbach-Eich-Dudelange, 9, rue de la Côte-d'Eich, à Luxembourg, (Grand-Duché de Luxembourg). — Présenté par MM. Mauduit et Gutton.

**Laboratoire électrotechnique de la Technische Hochschule**, représenté par M. le Prof. Dr. Niethammer, Husova 5 à Prague 1 Tchécoslovaquie. — Présenté par MM. Bethenod et E. Roth.

**Lambottin** (Georges), ingénieur attaché à la Cie d'Orléans S. E. S., 7, Boulevard de L'Hôpital, à Paris (13<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Marche-Marchad** (Daniel), ingénieur aux Laboratoires Standard, 46, avenue de Breteuil, à Paris (7<sup>e</sup>). Domicile, 87, avenue Emile-Zola, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Lecorguillier et Boulouvard.

**Martin** (Marcel-Jean), Directeur de la Société Interrégionale de Distribution d'Energie Electrique, à Brive (Corrèze). — Présenté par MM. Boutonnet et L. Rousseau.

**Padliasky** (Ilia), directeur des Etablissements G. Kraems (Asnières), 40, rue Bokanowski, à Asnières (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Schepers** (André-Jean), ingénieur à la Compagnie d'Electricité de Limoges, directeur Teutsch, à Strasbourg (Bas-Rhin). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Reynders** (Maurice), ingénieur du Génie Rural, ingénieur E. S. E., 7, rue Edouard-de-la Compagnie de Gaz et d'Electricité du Limousin, 59, avenue Baudin, à Limoges. — Présenté par MM. Boutonnet et L. Rousseau.

**Société d'Eclairage Electrique de Cannes**, 3, rue d'Alger, à Cannes (Alpes-Maritimes).  
Présenté par MM. Bunet et Grosselin.

**Yallais** (François-Louis), ingénieur à la Société des Forces Motrices d'Arrens, 140 bis, rue de Tocqueville, à Paris (17<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Boutan et Laqueille.

**Weber** (René-Pierre), ingénieur à la Société des Lignes Télégraphiques et Téléphoniques, 52, rue Gay-Lussac, à Paris (5<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert

**Westinghouse Electric and Manufacturing Company**, East Pittsburgh, Pennsylvania, États-Unis. Présenté par MM. Bethenod et Grosselin.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. le Président fait part du décès de M. John LIEB.

Notre très distingué collègue des Etats-Unis, premier vice-président de la New-York Edison Company, né en 1860, sorti en 1880 du Stevens Institute of technology, LIEB débuta comme dessinateur à la Brush electric Company, puis installa, sous la direction d'Edison, dans Pearl Street la première station souterraine de distribution d'Electricité. Il collabora dans le Laboratoire d'Edison, à un certain nombre d'inventions et notamment, pendant près de cinquante ans, à un perfectionnement apporté à la lampe à incandescence.

Il avait été président de l'American Institute of electrical Engineers, il avait reçu en 1923, la médaille Edison pour ses travaux sur les génératrices électriques et la France lui avait conféré le grade d'officier dans l'ordre de la Légion d'honneur.

Président effectif du Haut Comité de réception de New-York, au Congrès international de l'Eclairage en 1928, il sut ménager aux délégués français un accueil qui restera pour eux inoubliable.

M. le Président fait part de différents dons faits à notre Société :

- a) Nouveau don de 25 000 francs de M. HUEBER ;
- b) Don par Mme SARRIAU, d'un appareil photographique avec ses accessoires et d'une collection de livres techniques, en souvenir de son fils, ancien chef de Travaux au Laboratoire central d'Electricité ;
- c) Don, par Mme MALLET DE LA RIVE, pour le Musée d'Ampère à Poleymieux, d'une lettre autographe d'Ampère à de la Rive.

M. le Président annonce que le Comité propose l'élection de M. Paul JANET comme Président d'Honneur.

Conformément à l'article 14 du règlement intérieur d'administration, M. le Président fait connaître les noms des membres de la Société que le Comité proposera à l'Assemblée générale du Samedi 4 janvier, pour son renouvellement partiel. Ces noms sont les suivants :

*Président pour 1931* : M. CHAUMAT.

*Vice-Présidents pour les exercices 1930-1931-1932* : MM. DARRIEUS et CELLERIER.

*Secrétaire général pour les exercices 1930-1931* : M. CARDON.

*Trésorier pour les exercices 1930-1931* : M. Marcel MEYER.

*Secrétaires pour les exercices 1930-1931-1932* : MM. GASTINE et LACHAISE.

*Membres pour les exercices 1930-1931-1932* : MM. ALLIAUME, AUBERT, BARILLOT, DAUVILLIER, DUVAL, FALLOU, FERY, GENISSIEU, GEOFFROY, GIRAULT, JOUAUST, LÉBOUCHER, LIÉNARD, MERCIER E., PESTARINI, DE PISTOYE, DE VALBREUZE.

*Commission des Comptes* : MM. SCHWARBERG, GIROUSSE et DU BOUSQUET.

L'ordre du jour appelle les communications techniques :

M. le Docteur HARALD NORINDER fait une communication accompagnée de projections fixes sur « *les recherches sur les surtensions des orages dans les grands réseaux de distribution* » <sup>(1)</sup>.

M. C. FLORISSON présente une communication sur « *Le sondage, la détection par échos et la signalisation en mer au moyen des ultra-sons dirigés. Les appareils actuels et leurs applications* ». <sup>(1)</sup>.

La séance est levée à 19 heures.

---

(1) Cette communication paraîtra in-extenso dans un prochain bulletin.

# CONSIDÉRATIONS SUR LES INDUSTRIES ÉLECTROCHIMIQUES ET ÉLECTROMÉTALLURGIQUES FRANÇAISES <sup>(1)</sup>

par M. P. BUNET

---

*Importance des industries électrochimiques et électrométallurgiques installées en France. — Usines hydrauliques et usines à vapeur. — Questions d'intérêt général. — Rendement des fabrications; récupérations et améliorations; nouveaux procédés à rechercher.*

*Importance des industries électrochimiques et électrométallurgiques.*

— On obtient immédiatement une mesure de l'importance des fabrications électrochimiques et électrométallurgiques françaises par la constatation de l'énergie électrique qu'elles absorbent. La France entière produit actuellement pour tous usages environ 15 milliards de kilowatt-heures chaque année ; nous atteindrons bientôt 20 milliards ; les industries dont nous parlons en utilisent quelque 15 pour cent.

L'aluminium seul, le plus important produit à ce point de vue, absorbe, à raison de 33 kWh par kilogramme — chiffre comprenant l'électrolyse et les opérations accessoires, que les progrès techniques réduisent quelque peu constamment — et pour une production de 24 000 tonnes, environ 80 000 000 kWh par an. La production augmentera, par suite notamment des nouvelles usines pyrénéennes qui viennent d'être terminées, et, avec 30 000 tonnes, atteindra l'ordre du milliard de kilowatt-heures par an.

L'industrie du carbure de calcium suit de près. La production française actuelle, qui va également augmenter avec de nouvelles installations créées, est environ de 150 000 tonnes par an. Une partie est employée pour la fabrication de l'acétylène, une autre, d'environ 40

---

(1) Conférence faite devant le Groupe du Sud-Ouest de la Société française des Electriciens, le samedi 30 novembre 1929.

pour cent, est transformée en cyanamide calcique, engrais azoté d'usage courant. L'absorption actuelle est de l'ordre de 600 millions de kilowatt-heures par an.

Les ferro-alliages, avec une production globale de 50 000 tonnes par an, doivent prendre l'ordre de 300 millions de kilowatt-heures.

L'acier électrique est porté dans les statistiques pour 120 000 tonnes par an, pièces coulées et lingots, demandant environ 120 millions de kilowatt-heures.

Les industries du chlore et de la soude, celle des chlorates absorbent 150 millions de kilowatt-heures par an, un peu moins peut-être actuellement.

La fixation de l'azote a déjà été comptée en grande partie dans la production de la cyanamide. L'azote ammoniacal, obtenu en se servant d'hydrogène électrolytique et l'azote nitrique obtenu par l'arc ou l'oxydation de l'ammoniaque, sont produits à raison de 5 000 tonnes par an du corps simple, absorbant environ 100 000 000 kWh. L'azote ammoniacal obtenu par compression en se servant d'hydrogène non électrolytique est une opération en dehors de notre sujet.

Il faut ajouter la production des métaux comme le sodium, le magnésium, le raffinage du cuivre et les dépôts métalliques, les fabrications d'abrasifs, de phosphore, de graphite et un certain nombre d'autres encore, absorbant une énergie plus faible, au moins pour l'instant.

On voit ainsi apparaître un total dépassant aujourd'hui, ou à bref délai, 2 milliards de kilowatt-heures par an, sinon 2 et demi.

*Usines hydrauliques et usines à vapeur.* — Autrefois, quand on parlait de grandes installations électrochimiques ou métallurgiques, on avait implicitement en vue l'utilisation des chutes d'eau. On s'aperçoit tout de suite, en effet, que le coût de l'énergie électrique est le plus souvent une part importante de la valeur des produits fabriqués, et qu'il est impossible d'envisager l'emploi de courant provenant des grandes stations centrales brûlant du charbon, avec les tarifs normaux les plus bas que consentent ordinairement ces entreprises pour des emplois industriels et continus. Si, par exemple, le prix le plus bas est 0,30 de nos francs actuels par kilowatt-heure transporté au lieu d'utilisation et transformé dans la nature requise par l'opération considérée, il sera impossible d'entreprendre la fabrication



de l'aluminium dont le prix est environ 10 francs au sortir des appareils producteurs. Il en est de même pour le carbure de calcium demandant quelque 4 kilowatt-heures par kilogramme et celui-ci se vendant 1,20 franc.

Le kilogramme de chlorate de sodium, à raison de 7,5 kWh serait chargé de 2,25 francs, ce qui est à peu près le prix de vente.

L'azote à raison de 20 kWh par kilogramme, résultat obtenu avec plusieurs procédés en usage, exigerait 6 francs d'énergie électrique, encore à peu près le prix de vente.

L'acide phosphorique pris sous forme de phosphates naturels et mis sous la forme réclamée par l'agriculture demande, au moyen de procédés employant les fours électriques, jusqu'à 16 kWh par kilogramme de phosphore, alors que ce dernier ne vaut guère plus de 4 francs dans les superphosphates.

Pour certains produits, rares en nombre, il en est autrement. Le plus important est sans doute l'acier. En le fabriquant au moyen de déchets ou riblons, la consommation d'énergie est de l'ordre de 1 kWh par kilogramme, peut-être un peu plus en moyenne pour le poids net des pièces de fonderie ordinaires. Les aciers de la qualité obtenue au four électrique ont un prix de 5 à 10 francs par kilogramme, tout au moins 3 francs. La consommation de courant, qui d'ailleurs fait économiser celle d'un combustible, coke ou autre, n'intervient donc pas avec la même importance que dans les exemples ci-dessus. C'est pourquoi l'usage de fours électriques pour la production de l'acier se développe même autour des grandes villes sans courant d'origine hydraulique, où l'acier coulé est demandé dès que les distributeurs d'énergie atteignent des prix raisonnables. Ainsi près de Paris se trouvent des fours, de puissance jusqu'à 800 kW.

La fonderie et les fabrications des alliages de cuivre, nickel, aluminium, utilisent maintenant également beaucoup de fours électriques qui sont plus précis que les fours chauffés au charbon ou au gaz, donnent lieu à moins de pertes de matières. Leur usage se répand en France. Aux Etats-Unis où ils ont beaucoup progressé, ils donneraient lieu à une consommation annuelle de l'ordre de 200 millions de kilowatt-heures.

Dans ces questions, deux faits importants doivent être considérés. Le premier est qu'autrefois les entreprises hydro-électriques se constituaient avec un capital relativement modéré et émettaient des obli-

gations pour une valeur bien plus considérable, à des taux bas, comme 4 pour cent, avec de faibles impôts. Ces taux ont été beaucoup plus élevés au cours de ces dernières années, 3 fois plus et davantage tout considéré ; ils tendent d'ailleurs à diminuer. Le prix des aménagements s'est beaucoup accru, souvent sensiblement au-delà du coefficient 5. On parlait avant la guerre, dans les industries qui nous occupent, de 1 centime, quelquefois un demi-centime par kWh, tandis qu'on est maintenant aux environs du décime.

Le second fait est la diminution de la consommation spécifique de charbon dans les usines thermiques, résultat de progrès techniques considérables. Cette consommation est réduite aux trois quarts, à la moitié quelquefois, de ce qu'elle était il y a peu d'années.

Il tend donc parfois à se faire un déplacement des usines électrochimiques, d'autant plus que les vallées des montagnes sont généralement des endroits peu favorables au recrutement d'un personnel plus exigeant et plus désireux de plaisir qu'autrefois.

Dans certaines contrées, en Allemagne notamment, on a créé de grandes stations centrales brûlant des charbons de qualités médiocres qu'il ne vaut guère la peine de transporter ; d'autre part, les lignes électriques ont également fait l'objet de nombreux perfectionnements. On parlait de lignes transportant au plus quelques dizaines de milliers de kilowatts, maintenant ce sont des centaines.

La meilleure solution est sans doute celle qui a été adoptée dans la région où nous nous trouvons : c'est la mise en commun sur un vaste réseau des ressources de beaucoup de chutes d'eau, des réservoirs aménagés ou créés, du raccordement à des usines brûlant du charbon, autant que possible de basse qualité, sur le lieu même de l'extraction. De ce réseau, chacun tirera l'énergie électrique dont il a besoin en tenant compte des ressources, en observant les préséances déterminées par l'importance du service effectué et le prix payé pour l'énergie. Comme les ressources d'énergie sont limitées, variables avec les saisons d'autant plus que l'eau intervient davantage, que la puissance prise par beaucoup d'applications importantes comme la lumière, la traction, la force motrice de beaucoup d'ateliers, varie selon les jours, les heures, le beau ou le mauvais temps, le gré des utilisateurs, le nombre des jours de repos, des industries électrochimiques et métallurgiques permettant, dans des limites plus ou

moins étendues, des variations de puissance, procurent à l'ensemble un effet régularisateur souvent très appréciable.

D'énormes stations centrales de régions dépourvues de chutes d'eau ont souvent une charge fort variable. Elles sont ainsi constamment à la recherche d'appareils d'utilisation fonctionnant pendant les heures de faible charge des machines, la nuit, le temps des repas. Pour cela, elles consentent à des prix, parfois extrêmement réduits, en faveur de ces applications, se contentant du remboursement des dépenses et d'une petite participation aux frais généraux. On songe donc bientôt ainsi aux applications électrochimiques et métallurgiques. Mais des considérations purement commerciales interviennent immédiatement.

Par exemple, on peut être tenté d'aborder les industries du chlore afin de produire localement, avec ce courant de moindre valeur, les produits utilisés pour la purification des eaux, le blanchiment, de faire l'eau de Javel, les chlorates de plus en plus employés pour la destruction des herbes. Comme actuellement, l'utilisation totale annuelle d'énergie électrique pour la fabrication de tous ces produits se tient tout au plus à 150 000 000 kWh, soit une puissance moyenne de 17 000 kW, si une dizaine de grandes stations centrales s'adjoignaient chacune une usine chimique utilisant seulement 1 000 kW en moyenne, ce qui est vraiment peu en comparaison de ce que sont ces stations, le marché des produits considérés serait profondément troublé et l'opération en deviendrait peu rémunératrice, ou même causerait des pertes.

Des usines centrales du Nord, liées à des mines de houille, où l'on brûle de mauvais charbons, installent ou projettent des fours à carbure de calcium, ce produit devant être vendu sous cette forme ou celle de cyanamide. Autrefois, les fours à carbure étaient caractérisés par la nécessité de ne pas les arrêter et de ne faire varier qu'assez peu leur puissance ; ils avaient souvent un médiocre facteur de puissance comme 0,8 et quelquefois 0,7 et pour cette raison on les faisait souvent fonctionner à une fréquence réduite, comme 25 ou 15 périodes par seconde. Actuellement, les progrès techniques permettent de construire de grands fours de 5 000 à 10 000 kW possédant une capacité calorifique suffisante pour que l'on puisse faire varier la puissance absorbée, ou même la supprimer temporairement, aux heures où la puissance électrique disponible a des emplois plus

rémunérateurs. Branchés directement sur les réseaux de fréquence 50 p: s, grâce à l'application d'un vieux principe dont les constructeurs de fours ne tenaient pas compte auparavant, leur facteur de puissance monte, quelquefois, au-dessus de 0,9.

Les mêmes considérations commerciales se montrent encore. Pour une énorme station actuelle, de puissance atteignant les centaines de milliers de kilowatts, une installation de fours devant régulariser la puissance livrée par la station, qui absorberait 20 000 kW en moyenne, serait probablement jugée d'un ordre de grandeur modéré. Cette unique installation produirait cependant à elle seule près de 50 000 tonnes de carbure par an, le tiers de toute la production française actuelle, et une proportion encore plus grande de notre consommation puisque nous avons exporté en 1927 et 1928, en excès sur les importations, 26 000 et 22 000 tonnes de carbure de calcium. Il est vrai que, au contraire, nos importations de cyanamide étaient en excès sur nos exportations de 8 000 et 7 000 tonnes.

*Questions d'intérêt général.* — Il faut remarquer, et cela peut atténuer ce qui précède, que la cyanamide ne représente qu'une partie de l'azote total réclamé par notre agriculture et qu'elle pourrait prendre davantage la place du sulfate d'ammoniaque et des produits nitriques importés en forte proportion.

L'intérêt qui existe à produire nous-mêmes les corps azotés qui nous sont nécessaires dépasse, comme on le sait, les question agricoles cependant si importantes. Il ne faut pas oublier qu'ils sont indispensables pour l'obtention des explosifs nécessaires en temps de guerre.

Les explosifs chloratés ont rendu pendant la dernière guerre d'immenses services. Nous ne fabriquons actuellement qu'une assez faible proportion de ce qui était alors utilisé. Tout usage nouveau, employant de grandes quantités, susceptible d'être immédiatement abandonné au profit d'autres, plus utiles à la défense nationale, est donc de première importance et c'est ainsi que la destruction des mauvaises herbes par l'emploi de chlorate de sodium apparaît comme une application à encourager.

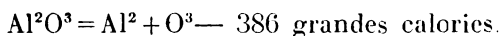
Ceci s'adresse encore à d'autres produits. Le graphite artificiel, obtenu au four électrique, qui est le constituant des électrodes indispensables à la fabrication de produits importants, nous vient en grande partie des Etats-Unis. On doit donc souhaiter que des fabrica-

tions françaises, dont certaines fonctionnent du reste déjà ou sont en préparation, nous mettent bientôt à l'abri de toute crainte.

Nous avons aussi le devoir d'économiser l'énergie électrique et il appartient aux ingénieurs, aux inventeurs, de perfectionner continuellement les procédés, comme il appartient aux dirigeants des sociétés industrielles qui en profitent d'affecter à ces recherches des moyens suffisants. Il faut d'abord nous efforcer d'améliorer le rendement des opérations actuelles, ou trouver d'autres procédés amenant plus économiquement au même but. Nous allons examiner quelques côtés de ce problème, et surtout son aspect technique.

*Rendement des fabrications. — Récupérations et améliorations. — Nouveaux procédés à rechercher.* — Une opération électrochimique ou métallurgique consiste généralement à prendre des produits sous une certaine forme et les transformer en une autre. Les deux états sont liés par les relations données par les équations chimiques. Ils sont liés également par une balance d'énergie. On part de corps représentant une certaine énergie potentielle au-dessus d'un zéro arbitraire : on arrive à des corps représentant une autre énergie potentielle, ordinairement plus élevée. Cet excès final d'énergie potentielle doit être fourni, dans notre cas, sous forme électrique. L'opération comporte, en outre, des pertes d'énergie inévitables : chaleur rayonnée, dérivations de courants, résistances des conducteurs et des contacts, réactions accessoires ou inverses, etc.

Prenons l'aluminium, par exemple. On l'extrait de son oxyde, l'alumine par électrolyse :



Cela veut dire que la combustion de 54 g d'aluminium dégage 386 calories ; c'est cette chaleur que l'on trouve disponible quand on pratique l'aluminothermie employée notamment pour la soudure des rails ; c'est aussi celle qu'il faut fournir pour transformer l'alumine en aluminium.

Dans le procédé actuel de fabrication, on électrolyse l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue, cette opération ayant lieu vers 900 °C. L'énergie est fournie purement sous forme électrique, en mettant à part la combustion des anodes. Celle-ci intervient-elle dans la réaction et le bilan thermique ? Ce ne semble pas démontré.

Si l'on traduit l'équation ci-dessus en langage d'électricien, elle nous montre que l'énergie potentielle d'un kilogramme d'aluminium est au-dessus de l'énergie potentielle de la masse d'alumine correspondante de 8,3 kWh.

Quel que soit le procédé que l'on emploie, électrolyse ou pure électrothermie, si l'énergie électrique est appelée à compenser la différence d'énergie potentielle entre le métal et son oxyde, il faudra toujours plus de 8,3 kWh par kilogramme, car il y a des pertes inévitables. Nous voyons ainsi apparaître nettement une limite à ce que l'on peut espérer atteindre.

Actuellement nous n'envisageons pas d'autre mode opératoire que l'électrolyse, et nous nous rendons compte qu'elle n'a pas un excellent rendement électrique, loin de là, pour cette première et plus forte raison qu'elle ne met en jeu qu'une tension utile de

$$386 \times \frac{4180}{96530} \times \frac{1}{6} = 2,80 \text{ V}$$

car il faut 4 180 joules pour représenter une grande calorie ; 96 530 coulombs libèrent 1 gramme d'hydrogène, et notre équation contient 2 Al ou 3 O correspondant à 6 H.

Il s'agit, en somme, de transporter 2,80 V utiles avec 10 000 à 30 000 ampères selon les appareils, d'une cuve à ses voisines, ou bien ce qui revient au même, en considérant un certain nombre de cuves en série, transporter peu de centaines de volts et ces mêmes courants sur une longueur de centaines de mètres, en intercalant une multitude de contacts et de corps assez peu conducteurs comme des agglomérés de charbon et des électrolytes fondus. La chute de tension atteint alors pour le moins la tension utile, de sorte que nous voyons apparaître un premier facteur de 0,5 ou même moins, portant sur le rendement de l'énergie.

Mais tout le courant ne sert pas à décomposer l'alumine ; une partie passe à des réactions secondaires ou parasites, à l'électrolyse des impuretés ; l'isolement assez précaire de ces cuves amène des dérivations de courant de l'ordre des centièmes. Il s'introduit donc un rendement en quantité qui peut être admis vers 0,75. On arrive ainsi pratiquement à faire passer le chiffre théorique de 8,3 à  $\frac{8,3}{0,5 \times 0,75}$  soit 22 kWh par kilogramme d'aluminium produit, pour le mieux. On

obtient actuellement, dans de rares conditions, et peut-être pas bien sûrement 25, et on monte souvent vers 30.

Peut-être trouvera-t-on quelque jour un nouveau procédé non basé sur l'électrolyse pour tirer l'aluminium de son oxyde ; peut-être fournirait-on une partie de l'énergie grâce à l'oxygène dégagé brûlant utilement un combustible, charbon ou autre ? Cette dernière réaction serait du reste assez peu importante, et appliquée intégralement à la production d'oxyde de carbone, il resterait théoriquement à fournir 6,5 kWh par kilogramme de métal.

Mais tout cela n'est pas trouvé ; le serait-il qu'il y aurait toujours les pertes calorifiques et les pertes électriques, qu'il faudrait transformer, transporter le courant ; si l'on arrivait pratiquement à 12 ou 15 kWh par kilogramme, c'est probablement tout ce que l'on peut espérer.

Peut-être encore trouvera-t-on un procédé de réduction de l'alumine n'utilisant pas du tout le courant électrique, mais on n'en voit pas la possibilité pour l'instant. Il faudrait d'ailleurs fournir toujours la même énergie ; cette nouvelle forme serait-elle plus économique que la forme électrique ?

Il résulte de ce qui précède que les fabricants d'aluminium sont en mesure de se rendre compte, avec une précision probable assez grande, des améliorations qu'ils peuvent raisonnablement espérer effectuer, ou du danger que peut faire peser sur leur sécurité industrielle l'apparition de nouveaux procédés.

Prenons un second exemple de produits fabriqués dans la région pyrénéenne. Le carbure de calcium est obtenu en utilisant la réaction purement thermique, effectuée à une température voisine de 3 000 °C :  $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$ —113 grandes calories.

Il manque donc 113 calories pour 64 grammes de carbure, ou bien il faut fournir, en traduisant, 2,05 kWh par kilogramme de carbure pur.

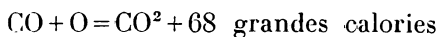
Les petits fours, seuls utilisés autrefois, de 1 000 kW ou moins, amenaient à une consommation voisine de 4 kWh par kilogramme de carbure brut. Les progrès techniques, dont ceux que nous rappelions ci-dessus, ont descendu ce chiffre vers 3 dans de récentes installations.

Comme il y a forcément des pertes calorifiques par les parois, par

les gaz dégagés, par les produits extraits à environ 2 000 °C, et aussi des pertes électriques à cause de la résistance des électrodes, des contacts, des barres et câbles d'amenée de courant, comme on ne charge pas de la chaux et du carbone chimiquement purs, loin de là, ce qui amène des réactions parasites, on voit ainsi que si l'on ne trouve pas d'autres procédés de fabrication impliquant la fourniture de l'énergie sous une forme plus économique que la forme électrique, et nous ne voyons rien dans cette voie, le fabricant de carbure est aussi en mesure de se rendre compte d'une manière assez certaine des répercussions que peuvent avoir sur son industrie les perfectionnements, probablement assez limités, dont on peut concevoir la possibilité scientifique.

Un problème se pose cependant. La réaction dégage de l'oxyde de carbone qui est lui-même un combustible. Le plus grand nombre des fours actuels, notamment ceux qui se voient dans cette région, le laissent s'échapper du four et brûler à la partie supérieure. C'est évidemment très simple, mais cette flamme qui couronne les fours ne va pas sans inconvénients ; l'oxyde de carbone a quelque valeur. Ne pourrait-on procéder, en le recueillant, à une récupération d'énergie, d'énergie électrique notamment.

L'oxyde de carbone brûle en donnant l'anhydride carbonique selon



ou 1,24 kWh par kilogramme de carbure pur. Nous voyons tout de suite d'ailleurs que cette énergie ne peut être employée partiellement à la réaction de la chaux sur le charbon, car elle ne peut produire la température dépassant 2 000 °C qui est nécessaire.

Cependant, récupérer, même partiellement, 1,24 kWh serait intéressant sur une absorption de 3 ou 4. En épurant les gaz issus des fours et les envoyant dans des moteurs actionnant des générateurs électriques, on recueillerait finalement, si tout va pour le mieux, tout au plus 0,3 à 0,4 kWh. On diminuerait ainsi de 10 pour cent l'énergie électrique dépensée, mais au prix d'une complication vraiment très grande — trop grande pour les petites et moyennes installations — et de l'introduction d'une machinerie coûteuse et assez délicate.

L'oxyde de carbone pourrait encore être utilisé comme combustible pour échauffer les matières en attente de réaction, ce qui se fait d'ailleurs plus ou moins dans les fours actuels ; on voit aisément qu'il



il n'y aurait que des avantages limités et des inconvénients comme l'attaque des électrodes et du charbon de la charge par l'oxygène en excès et l'anhydride carbonique.

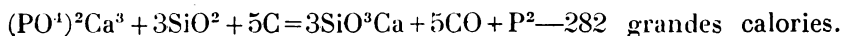
On pourrait enfin fabriquer la chaux nécessaire en cuisant la pierre calcaire dans des fours à gaz oxyde de carbone ; on économiserait ainsi seulement dans ces fours, tous calculs faits, 0,2 kg de charbon par kilogramme de carbure, soit un ordre de 3 centimes sur un produit valant 1,2 franc.

D'autre part, cette utilisation des gaz force à employer des fours plus coûteux, fermés, où l'air ne doit pas pouvoir entrer ou bien il se produit des explosions. Aussi l'oxyde de carbone n'est-il pas couramment recueilli. Quoique cela ait été pratiqué à Niagara, il y a déjà vingt-cinq ans, de grands fours américains plus modernes ne le comportent pas. En Europe, on parlait aussi de modèles de fours à récupération il y a une vingtaine d'années : peu d'exemplaires ont été réalisés.

En passant, rappelons que dans un modèle de fours électriques assez analogue, le haut fourneau électrique produisant la fonte, on recueille cependant l'oxyde de carbone, comme on le fait d'ailleurs dans les hauts fourneaux non électriques modernes. Mais alors, le même dégagement d'oxyde de carbone correspond à un prix de produit fabriqué 4 ou 5 fois plus petit ; d'autre part, ce que l'on peut tirer de l'oxyde de carbone est une récupération 3 fois plus importante que dans le cas du carbure par rapport à l'énergie nécessaire à la réaction.

Passons, par contre, à une autre réaction dont les applications se développent actuellement, celle de l'acide phosphorique. Le problème consiste à transformer l'acide phosphorique contenu dans des phosphates naturels, insolubles dans le sol, en acide phosphorique soluble. Si l'on résout la question au moyen d'un traitement au four électrique, on constate qu'il faut fournir une quantité d'énergie plutôt considérable. D'autre part, on prend des phosphates, on arrive à d'autres phosphates assez analogues, avec une différence d'énergie potentielle entre le point de départ et le point d'arrivée faible ou inexistante. Globalement, en ne considérant que le produit que l'on a en vue de fabriquer, le rendement en énergie est à peu près nul. Des espoirs de perfectionnements importants apparaissent donc immédiatement. Voyons la question de plus près. On prend du phosphate de

calcium naturel tricalcique, on ajoute du charbon et de la silice ; on chauffe dans un four analogue à un four à carbure, mais bien fermé, et à une température sensiblement inférieure. Il se dégage de l'oxyde de carbone et du phosphore et il reste du silicate de calcium, sans valeur ou à peu près :



Traduit en unités électriques, cela amène à 5,3 kWh par kilogramme de phosphore. En pratique, nous trouvons qu'il en faut beaucoup plus ; l'échauffement des matières premières demande relativement beaucoup de chaleur, d'autant plus qu'elles contiennent une forte proportion d'impuretés, les pertes calorifiques, les pertes électriques, amènent vers 20 kWh par kilogramme avec les anciens petits fours ; le chiffre minimum publié est 12, mais il se rapporte à l'emploi de matières exceptionnellement pures. Aussi 16 kWh par kilogramme de phosphore dégagé est-il un chiffre moyen raisonnablement admis, même pour des fours de quelques milliers de kilowatt-heures.

Le phosphore est peu employé, tandis que l'acide phosphorique a des usages agricoles immenses, qui se développent constamment. On brûle donc le phosphore produit pour constituer l'anhydride phosphorique au moyen duquel on prépare aisément tous les phosphates que l'on désire.

La remarque que nous avons faite sur l'inexistence d'un rendement en énergie a pour corollaire une consommation onéreuse de cette énergie. L'emploi de 16 kWh par kilogramme de phosphore vendu aux environs de 4 francs, en la forme des superphosphates actuels, constitue une dépense considérable sauf si l'énergie électrique est d'un prix infime qu'on ne voit plus ou à peu près.

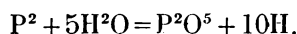
D'autre part, l'explication principale du mauvais rendement est le fait que l'on brûle le phosphore, dégageant ainsi une grande quantité de chaleur, et que l'on perd ainsi cette énergie potentielle du phosphore au-dessus de l'acide phosphorique.

La récupération de tout ce que l'on pourra est donc d'une extrême importance. Tout d'abord, il faut évidemment des fours étanches et sans rentrées d'air à cause de la vapeur de phosphore ; recueillir l'oxyde de carbone est donc facile.

Un type de fours américains, et d'autres analogues proposés ou exécutés, sont de grande hauteur, remplie en grande partie de matiè-

res premières en attente de réaction. Le phosphore et l'oxyde de carbone les traversent en abandonnant une partie de leur chaleur, puis, à une certaine distance, on admet un peu d'air. La combustion des deux corps dégage de la chaleur qui se transmet aux matières premières ; il y a bien quelques inconvénients comme le risque de combustion du charbon qui constitue une partie de la charge, qui doit arriver jusqu'en bas, dans la zone de réaction. Tout examiné, en calculant ce que représente l'échauffement admissible de la charge, on arrive à concevoir l'économie possible de tout au plus 4 kWh sur les 16, et il semble que le plus grand espoir de récupération de cette sorte ne peut amener qu'à 12 kWh par kilogramme de phosphore ou bien peu au-dessous. C'est cependant déjà un progrès.

Une autre voie a été ouverte sous le nom de procédé Liljenroth qui est, paraît-il, bien au point en Allemagne à l'heure actuelle. On conserve le four électrique sous sa forme simple, en gardant la consommation spécifique de 16 kWh environ. Le mélange d'oxyde de carbone et de vapeur de phosphore, sortant du four, arrive dans une chambre où l'on envoie de la vapeur d'eau et un peu d'air. Il se produit de l'anhydride phosphorique et de l'hydrogène par une réaction qui n'absorbe pas d'autre énergie que celle apportée par une petite combustion, au moyen de l'air légèrement introduit avec la vapeur d'eau



Pour chaque kilogramme de phosphore, on recueille théoriquement 0,16 d'hydrogène, pratiquement ce serait probablement vers 0,11.

On traite aussi l'oxyde de carbone obtenu par la vapeur d'eau sur des catalyseurs spéciaux, ce qui donne de l'anhydride carbonique et encore autant d'hydrogène. Si l'on se sert de tout cet hydrogène pour fabriquer de l'ammoniaque par compression avec de l'azote, on fixe 1 kilogramme d'azote par chaque kilogramme de phosphore, moyennant une dépense de 3 kWh supplémentaires pour actionner les compresseurs et les accessoires.

En résumé, on aurait ainsi, en attribuant au phosphore et à l'azote, sous forme d'engrais, les prix ronds de 4 et 6 francs le kilogramme.

|                                        | Consommation<br>en kilowatt-heures | Recettes<br>en francs |
|----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Sans récupération . . . . .            | 16                                 | 4                     |
| Récupération calorifique . . . . .     | 12                                 | 4                     |
| Récupération par l'hydrogène . . . . . | 19                                 | 10                    |

L'ammoniaque et l'acide phosphorique peuvent être vendus séparément ; on livrerait aussi bien du phosphate d'ammoniaque et d'autres corps.

Il faut naturellement considérer que la consommation d'énergie électrique n'est pas tout, qu'il existe d'autres dépenses ; aussi les chiffres ci-dessus, utiles pour des comparaisons, n'ont-ils pas de valeurs définitives et absolues.

Enfin, rien ne prouve qu'on ne puisse, par des procédés électriques ou non, transformer l'acide phosphorique des produits naturels en d'autres formes désirées par l'agriculture (les supersphosphates constituent déjà une solution) sans passer par le phosphore libre qui est une cause de mauvais rendement de l'énergie. Ainsi, le traitement des phosphates naturels par la silice, sans addition de charbon, dans le four électrique, a fait l'objet de recherches ; on remplacerait simplement les acides phosphorique et silicique l'un par l'autre, le premier se dégageant en fumées, l'autre se fixant à la chaux. Jusque maintenant la réalisation industrielle a échoué.

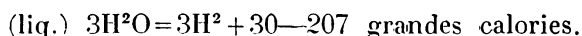
Ajoutons en terminant que beaucoup d'installations actuelles utilisent, pour séparer les fumées d'anhydride phosphorique des gaz dans lesquels il flotte, la précipitation par haute tension continue.

La fixation de l'azote nous offre des exemples analogues, amenant à la conception de la possibilité de progrès susceptibles de changer la face de ces industries électrochimiques.

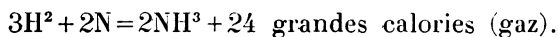
Mettons de côté, comme en dehors de notre sujet, la fabrication d'ammoniaque par compression en partant d'hydrogène tiré des gaz issus de divers fours, comme on le fait à Toulouse. L'électricité n'y est employée que dans des moteurs et accessoires, qui absorbent environ 3 kWh par kilogramme d'azote fixé.

De grandes usines sont construites pour électrolyser l'eau afin d'en tirer l'hydrogène ; l'oxygène est souvent perdu en grande partie ; de telles installations se voient sur les deux versants des Pyrénées notamment. L'usine de Soulom renferme la belle sous-station de commutatrices réputée la plus puissante d'Europe avec ses sept unités de 3 800 kW chacune, toutes affectées à l'électrolyse de l'eau.

On part, dans ces procédés, d'eau rendue conductrice par de la soude ou de la potasse qui n'interviennent pas dans la décomposition électrolytique



Puis on tire de l'azote, le plus souvent par distillation de l'air liquide ; on mélange trois volumes d'hydrogène et un d'azote, on comprime vers 800 atmosphères dans les procédés utilisés en France (Claude, Casale) à la température de 500 °C environ ; la réaction dégage de la chaleur



Il faut donc fournir théoriquement la différence d'énergie potentielle, soit 183 calories pour 28 grammes d'azote ou, en traduisant, 7,6 kWh par kilogramme d'azote fixé.

En pratique, il en faut 18 à 20, soit un rendement en énergie de 40 pour cent. Examinons les pertes

Théoriquement, l'eau se décompose avec une force électromotrice de 1,49 volt, et 1 kilogramme d'hydrogène exige 40,1 kWh. En pratique, la perte, à peu près unique de l'électrolyseur provient de sa résistance faisant monter la tension aux bornes souvent vers 2,5 volts. Plus on élève la densité de courant dans un appareillage donné, plus la production augmente, plus la tension augmente et plus le rendement baisse : il y a donc à mettre en balance le coût d'installation et le prix de l'énergie électrique.

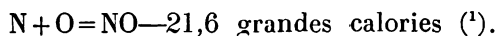
En pratique, il faut donc ordinairement 65 kWh par kilogramme d'hydrogène, soit un rendement des électrolyseurs de 60 pour cent, les quatre dixièmes restants étant dissipés en chaleur. Cela correspond à 14 kWh par kilogramme d'azote fixé.

Quoique la formation d'ammoniaque libère de l'énergie, les compresseurs et appareils annexes divers demandent encore 3 kWh. Au total, nous arrivons ainsi à 17. Les pertes inévitables de matières, d'hydrogène notamment, augmentent un peu ce chiffre, à 18 et quelquefois un peu au delà.

Il est à remarquer que si nous avons choisi la voie concurrente, celle de la cyanamide obtenue par fixation directe de l'azote sur le carbure de calcium, nous serions conduits à la même dépense, à peu près, d'énergie électrique. Le rendement final en énergie, dans l'opération totale de production de cyanamide est plus faible que ce qu'il était dans l'état intermédiaire de carbure, puisque la réaction de l'azote sur le carbure dégage de la chaleur qui est perdue par le fabricant.

Passons à l'azote nitrique.

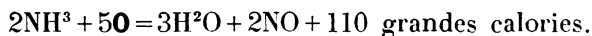
En gros, nous prenons de l'azote et de l'oxygène dans l'air et nous obtenons d'abord du bioxyde d'azote NO, suroxydé ensuite dans des tours spéciales par des opérations purement chimiques. Arrêtons-nous pour l'instant à ce corps ; il représente, en partant de l'oxygène à l'azote



Il faut fournir de l'énergie pour qu'il se forme à partir des éléments ; en traduisant, cela donne 1,8 kWh par kilogramme d'azote fixé. Les procédés de Birkeland, employés en Norvège et les procédés analogues brûlent simplement l'azote de l'air dans un arc électrique. Ils consumaient quelque 60 kWh par kilogramme d'azote, et s'abaisseraient dit-on vers 50, peut-être moins, moyennant certains perfectionnements. Le rendement est ainsi vers 3 pour cent ; 97 pour cent de l'énergie électrique passent en chaleur emportée par les gaz traversant l'arc. On comprend pourquoi ces procédés n'ont pu se développer ailleurs qu'en Norvège où les chutes d'eau sont particulièrement avantageuses. On tend d'ailleurs à les abandonner même dans ce pays.

Le procédé qui consiste à oxyder ou brûler de l'ammoniaque par de l'air, enrichi quelquefois en oxygène, sur de la toile de platine, conduit, en partant d'eau électrolysée, à 20 ou 22 kWh par kilogramme d'azote, un peu plus que sous forme ammoniacale, car il y a une certaine quantité d'azote, environ 10 pour cent, retournant à l'état de corps simple pendant la combustion de l'ammoniaque. En comparant à 1,8 kWh théorique, le rendement en énergie est ainsi vers 8 pour cent.

Au point de vue de la bonne utilisation de l'énergie, l'opération est donc assez médiocre. L'équation de l'oxydation est : (tous corps gazeux) :



Elle nous montre que nous avons un dégagement de chaleur représentant 4,5 kWh par kilogramme d'azote ammoniacal entrant ou 5 kWh par kilogramme d'azote nitrique sortant. On reproduit l'eau qui a été décomposée dans les électrolyseurs, mais  $\frac{110}{207}$  ou 53 pour

---

(1) Les chaleurs dégagées ou absorbées sont variables avec l'état dans lequel les corps sont considérés, avec la température. Les différents expérimentateurs ne donnent pas des chiffres très concordants. Nous recherchons d'ailleurs surtout à dégager des ordres de grandeur.

cent de l'énergie théorique absorbée par la décomposition de l'eau retournent purement et simplement en chaleur dans cette production d'eau ultérieure, étant ainsi perdus sauf ce que l'on peut récolter en produisant de la vapeur utile aux opérations chimiques de l'usine.

Ne peut-on faire mieux ? Théoriquement oui : ainsi on peut constituer pour effectuer la réaction de l'ammoniaque et l'oxygène, une pile à gaz (analogue à la pile de Grove vieille de quatre-vingt-dix ans où l'hydrogène et l'oxygène arrivant sur des électrodes de platine pulvérulent redonnent l'eau, en fournissant une quantité d'électricité presque égale à celle ayant passé dans le voltamètre produisant les deux gaz) ; de cette pile à gaz on tirerait une portion importante de l'énergie actuellement transformée en chaleur, et avec un certain nombre d'éléments en série on produirait une partie de l'hydrogène nécessaire. La question a fait l'objet de recherches théoriques, mais est encore loin des réalisations pratiques, semble-t-il.

Suivons maintenant l'azote plus loin, dans la direction de l'acide nitrique, état final. Nous trouvons les états suivants, sommant les réactions :

|                                                                                    | kWh théoriques<br>par kilogramme<br>d'azote |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| $2N + 2O = 2NO - 43,2$ grandes calories (absorbées) . . . .                        | 1,8                                         |
| $2N + 4O = N_2O^4 - 3,4$ — — — — . . . .                                           | 0,15                                        |
| $2N + 5O = N_2O^5 - 1,2$ — — — — . . . .                                           | »                                           |
| $2N + 5O + H_2O = 2NO^3H + 10$ à $14$ g <sup>100</sup> calories (dégagées) . . . . | »                                           |

Nous voyons donc l'énergie potentielle baisser, et par conséquent le rendement en énergie s'effondrer au fur et à mesure des oxydations successives. Finalement il tombe à zéro (au-dessous pourrait-on dire), puisque prendre de l'eau, de l'azote, de l'oxygène, soit de l'air et de l'eau à notre disposition gratuitement en quantités indéfinies et recueillir de l'acide nitrique, constitue un abaissement de l'énergie potentielle.

Ce résultat se trouve immédiatement en considérant que  $H_2O$  représente une énergie potentielle de 69 calories au-dessous de  $H_2$  et  $O$  séparés, qui dégagent précisément cette quantité de chaleur en se combinant sous forme d'eau liquide. Cette même différence d'énergie est à considérer en prenant pour points de départ  $2H$  et  $O$  séparés, puis  $5O$  et  $2N$  à l'état de corps simples pris dans l'air restant tels quels.

L'acide nitrique  $2NO^3H$  correspondant représente une énergie poten-

tielle au-dessous des mêmes constituants, soit 2N, 6O et 2H, de 83 calories. L'acide nitrique représente donc 14 calories au-dessous de l'énergie potentielle de ses constituants à l'état d'air et d'eau. Théoriquement, en le fabriquant depuis ceux-ci, on pourrait recueillir environ un demi kilowatt-heure par kilogramme d'azote fixé si l'on disposait d'un procédé idéal.

Nous avons ainsi effectué ces immenses travaux pour prendre de l'eau, la faire couler dans un canal, dans des conduites, passer dans des turbines. Les turbines actionnent des alternateurs dont le courant triphasé est transformé, transporté, transformé en basse tension puis en grande partie en courant continu. Nous électrolysons de l'eau et en tirons de l'hydrogène ; nous liquéfions de l'air et nous en tirons de l'azote. Nous mélangeons ces gaz ; nous comprimons et nous obtenons de l'ammoniaque. Ce corps est oxydé sur du platine et les oxydes d'azote sont finalement transformés en acide nitrique.

A ce moment, nous avons transformé en chaleur, qui se dissipe dans la contrée avoisinante, toute l'énergie de la chute d'eau, tout aussi bien qu'elle se serait transformée sans notre intervention par l'arrêt brusque de la force vive des chutes, par le frottement qu'aurait exercé l'eau sur son lit si nous l'y avions laissée. Nous avons finalement fabriqué un corps qui représente moins d'énergie potentielle que ceux dont nous sommes partis. Ce n'est peut-être pas à priori une constatation bien satisfaisante pour notre amour-propre ; notre première excuse est que nous ne savons pas faire mieux pour obtenir le résultat chimique désiré, en appliquant nos connaissances actuelles.

Comme seconde excuse, devons-nous toujours prétendre que le bon rendement en énergie est une considération à laquelle il faut tellement s'attacher si l'on regarde de plus haut que du désir de bénéfices commerciaux ? Les idées des électriciens, leur mentalité pouvons-nous dire, sont à ce sujet bien spéciales. Leurs machines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement, l'énergie électrique en une autre forme électrique, d'autres transformations encore, avec un coefficient fort élevé. La facilité de mesure de ce coefficient augmente encore l'importance qu'ils lui attribuent. La simplicité des transformations de l'énergie qui en résulte a été aussi un grand facteur dans le succès des transports et des distributions.

Cependant, lorsque, par exemple, nous nous éclairons, nous pre-



nons de l'énergie électrique et la transformons finalement en chaleur. Avons-nous fait une opération nécessaire ? Non, diront certains, car nous aurions pu nous passer de lumière, en dormant par exemple. Que devient la notion de rendement ?

Ne fabriquons-nous pas de la glace qui représente une énergie potentielle au-dessous de celle de l'eau, en consacrant encore de l'énergie mécanique à l'opération et sans parler couramment d'un rendement précédé du signe moins ?

La nature opère-t-elle avec bon rendement, à la manière dont on serait tenté de l'entendre ? Assurément non. Si nous examinons ce que reçoit d'énergie solaire et astrale un champ et ce que représente la récolte, en énergie potentielle, nous trouvons des nombres bien bas.

N'a-t-on pas estimé que l'énergie reçue par la terre, en moyenne, des astres, soleil et étoiles, ne l'évaluant pas avec des chiffres astronomiques en usant des unités ordinaires, correspond annuellement à la fusion d'une couche générale de glace de 70 mètres ? En comparaison, l'énergie totale que représente la combustion de la houille et les chutes d'eau est mesurée, pour un pays comme le nôtre (soit au-dessus, à ce point de vue, de la moyenne du globe) par la fusion de quelques millimètres de glace par an sur tout le territoire. Nous laissons ainsi retourner dans l'espace une quantité formidable d'énergie qui est venue chez nous ; serait-il bien exact de dire que nous la laissons perdre ?

Revenons à la fixation de l'azote. Nous constatons un rendement d'énergie dont on peut être satisfait quand on s'arrête, en opérant électrochimiquement, à la forme ammoniacale. Ce rendement tombe à rien quand nous allons à la forme nitrique. Il ne faut pas en conclure que cette seconde opération est à rejeter. Tout d'abord, le kilogramme d'azote s'obtient presque avec la même consommation de kilowatt-heures dans les deux cas. L'azote nitrique représente une énergie potentielle inférieure ; mais qu'y pouvons-nous ? On admet généralement que les engrais ammoniacaux, la cyanamide aussi, s'oxydent dans la terre et que les plantes demandent la forme nitrique. L'énergie potentielle de l'ammoniaque, perdue brutalement dans les appareils oxydants de nos usines se perd aussi bien et tout doucement dans la terre.

Comme finalement, nous voyons que tous nos grands moyens de

fabrication de l'azote nitrique ne mettent en jeu qu'une énergie de total à peu près nul, il ne faut pas nous étonner que des plantes, toutes seules, prennent de l'azote dans l'air et le fixent, sans avoir besoin d'énergie électrique, de fortes pressions, de températures élevées. Nous ne connaissons pas leur secret. Il est vrai qu'elles disposent sans compter de deux facteurs, le temps et l'espace, alors que dans nos usines nous voulons réaliser rapidement de grandes quantités.

Enfin, nous devons penser que l'on trouvera peut-être, certains le croient, d'autres procédés plus élégants, d'introduire l'azote dans les plantes, comme par des cultures microbiennes appropriées.

Nous avons, dans cet examen de quelques industries électrochimiques, essayé de dégager et de résumer des idées directrices indispensables à ceux qui désirent rechercher les voies de perfectionnements possibles et à ceux qui veulent se rendre compte de la valeur industrielle et commerciale de procédés déjà en œuvre ou d'inventions proposées.

Nous ne saurions, au reste, prétendre que les industries amenant à de mauvais rendements en énergie doivent être rejetées ; elles ne pourront l'être que lorsque des progrès suffisants apparaîtront. En attendant qu'ils se manifestent, la mise en œuvre de ces moyens, théoriquement peu satisfaisants, peut pratiquement être indispensable et rémunératrice.

---

# USINES HYDRO-ÉLECTRIQUES ET LIGNES A 220 000 VOLTS AUX ÉTATS-UNIS

par M. Ch. DUVAL

*Directeur des Services Electriques de la Société Générale d'Entreprises*

---

*Développement économique. — Lignes à 220 000 V. — Usines du Big Creek. — Usines du Pit River. — Usine de Conowingo. — Equipement électrique. — Conclusions.*

La mise en service prochaine d'un réseau de transmission d'énergie électrique sous la tension de 220 000 volts entre le massif central français et la région parisienne vient apporter un certain intérêt à l'examen du fonctionnement des trois installations à 220 000 volts actuellement en exploitation en Amérique.

C'est surtout en Californie que l'emploi des très hautes tensions s'est développé du fait de la grande distance entre les chutes et les centres de consommation aussi bien que par suite de l'accroissement rapide de la quantité d'énergie à transporter. La tension de transport de 220 000 volts adoptée à SAN FRANCISCO et à LOS ANGELES est parfaitement adaptée aux longueurs des transmissions qui sont de 325 à 400 km.

## I. — DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE

Les premières installations hydrauliques en Californie datent de 1889, leur développement se fit rapidement durant les dix premières années de 1890 à 1900 par suite du prix élevé des charbons à cette époque (100 à 275 fr la tonne).

A l'origine, les Sociétés productrices d'énergie avaient toute latitude pour installer leurs usines sur les cours d'eau de leur choix et sur les terrains appartenant au Gouvernement Fédéral. Cela favorisa les premières installations.

Leur importance augmentant donna lieu à une législation réclamée par les producteurs pour la sauvegarde des droits et intérêts du public qu'on a toujours traité avec beaucoup d'égards, puisqu'il est consommateur.

Théoriquement, la distribution d'énergie électrique ayant le caractère d'un monopole doit rentrer dans ses dépenses (frais d'entretien, d'amortissement, impôts, assurances, salaires, etc...) et faire un bénéfice au plus égal à 8 pour cent du capital investi en installations de toutes sortes, ceci pour couvrir l'intérêt du capital, l'amortissement des obligations et le paiement du dividende.

Les tarifs négligent toute considération géographique, mais sont déterminés suivant l'utilisation de l'énergie, non sur une base scientifique, mais sur une base d'équité

La consommation par habitant est maintenant de 1 600 kWh par an, soit deux fois et demie la consommation annuelle par habitant pour l'ensemble du territoire fédéral. La Californie produit donc 9,5 pour cent de l'énergie totale des U. S. A. pour une population égale à 3,5 pour cent de la population totale.

L'industrie agricole a particulièrement profité de ce développement : en effet, 62 pour cent des fermes sont électrifiées. Pour la même raison, la décentralisation des agglomérations s'est accentuée pour s'étendre à des régions jusque-là inhabitées.

Les installations hydroélectriques et thermiques se sont développées parallèlement. En effet, les quantités d'eau varient de 75 millimètres pour 1 année sèche dans les contrées arides à 2,90 m pour 1 année pluvieuse dans certaines parties de l'Etat. Il en résulte une variabilité extrême des débits et l'obligation de prévoir de grosses accumulations : celles-ci ne peuvent toutefois être suffisantes pour régulariser parfaitement, car on observe suivant les années des variations de 33 pour cent dans le débit annuel.

On a suppléé à l'insuffisance de l'accumulation hydraulique par l'installation de centrales thermiques utilisées pour les pointes, ce qui permet de réduire l'installation hydroélectrique et d'élever son facteur de charge.

Au 1<sup>er</sup> janvier 1926, sur une puissance installée totale de 2 millions de kilovolts-ampères, 650 000 kVA étaient de provenance thermique.

Quand les installations hydrauliques seront complètement installées, les installations thermiques seront peut-être aussi importantes, sinon plus.

Le tableau plus loin résume la situation économique.

Le capital moyen par kVA de puissance installée est de 16 pour cent plus élevé pour la Californie que pour les Etats-Unis, les deux tiers

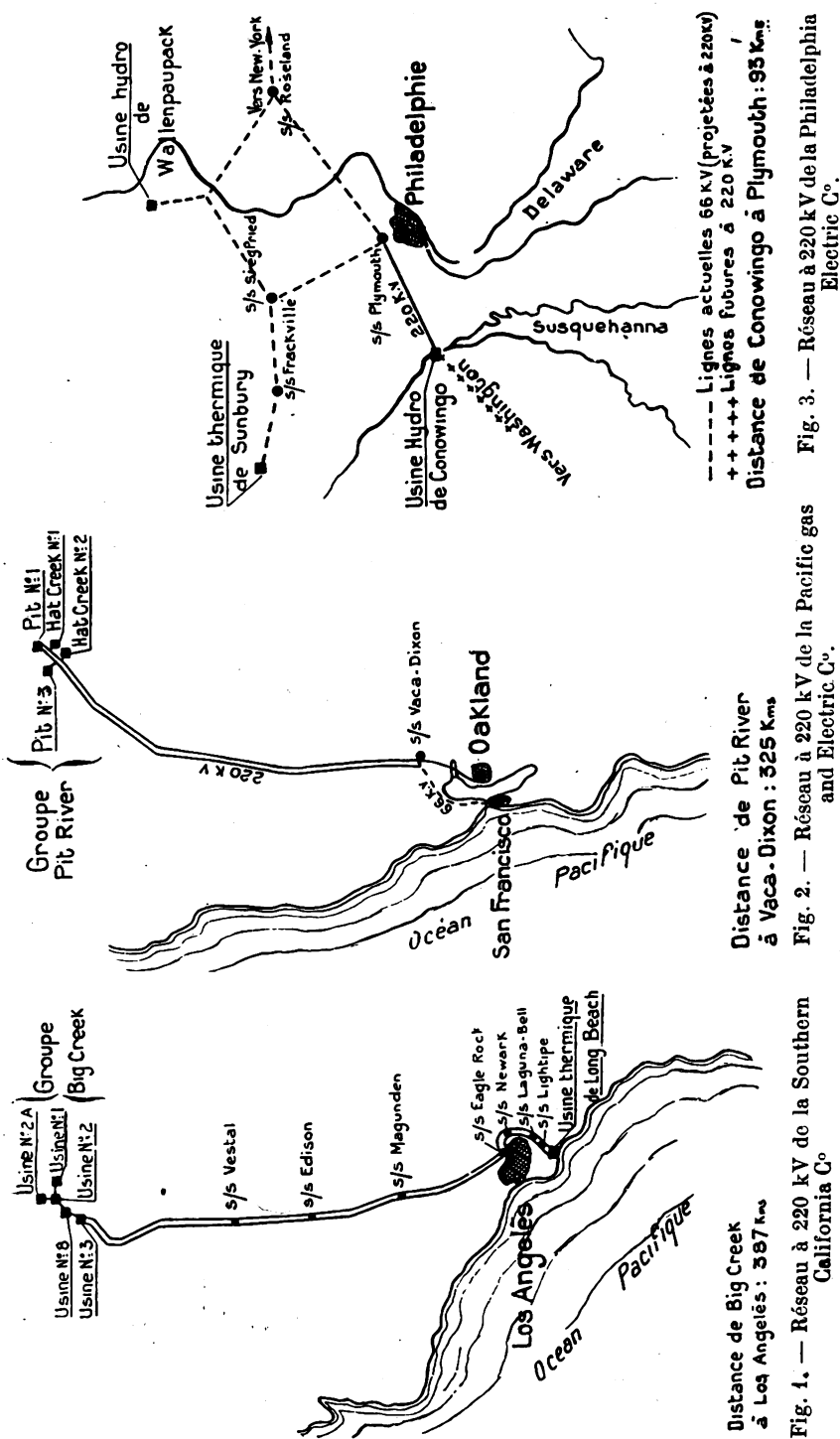
de la puissance sont d'origine hydraulique (c'est l'inverse aux Etats-Unis) et le kVA installé sous forme hydraulique exige un capital plus important ; de même les pertes dans les lignes de transport sont plus importantes.

|                                                                                                                                        | ÉTATS-UNIS     | CALIFORNIE    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------|
| Total des capitaux engagés dans la distribution électrique de force et de lumière au 1 <sup>er</sup> Janvier 1927 en dollars . . . . . | 8.400.000.000  | 817.000.000   |
| Puissance installée totale au 1 <sup>er</sup> Janvier 1927 en kVA. . . . .                                                             | 26.812.710     | 2.088.800     |
| Ventes en kwh. . . . .                                                                                                                 | 55.468.000.000 | 5.000.000.000 |
| Capital moyen engagé par kVA de puissance installée en dollars . .                                                                     | 313            | 391           |
| Prix de vente moyen par kWh en cents . . . . .                                                                                         | 2,83           | 2             |
| Production par kVA de puissance installée en kWh . . . . .                                                                             | 2.563          | 3.303         |
| Facteur d'utilisation . . . . .                                                                                                        | 29,2           | 37,7          |
| Ventes par kVA de puissance installée en kwh . . . . .                                                                                 | 2.069          | 2.394         |
| Bénéfice brut par kVA de puissance installée . . . . .                                                                                 | 58,60          | 48            |

L'abonné se trouve mieux partagé en Californie, le prix de vente moyen y étant 23 pour cent moindre qu'aux Etats-Unis.

La durée d'utilisation des usines est très bonne en Californie ; pour les quatre grandes Sociétés, elle est de :

| Année 1916                                       | Puissance de pointe en kW | Facteur de charge en pour cent |
|--------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Pacific Gas and Electric Co (San Francisco)..... | 407.000                   | 60,5                           |
| Southern California Edison Co (Los Angeles)..... | 422.700                   | 60,2                           |
| Great Western Power Co.....                      | 135.230                   | 59                             |
| San Joaquin Light et Power Co.....               | 131.490                   | 54                             |



Ces deux dernières Sociétés ont été inter-connectées par une ligne de 160 km de long capable de transporter 70 000 kW sous 165 000 volts et dans l'avenir 125 000 kW sous 220 000 volts.

Il en est aussitôt résulté une diminution de 5 pour cent kilowatts sur la puissance de pointe de l'ensemble et un accroissement du facteur de charge d'environ dix points, ce qui montre bien les avantages dus à l'interconnexion.

Le prix de revient de l'énergie dépend essentiellement du facteur de charge.

Même en se plaçant dans des conditions idéales de facteur de charge, en le supposant par exemple égal à 100 pour cent et malgré le capital investi inférieur, des usines thermiques du fait des dépenses courantes plus élevées, le coût de l'énergie thermique tend à dépasser le coût de l'énergie hydraulique. Le contraire a lieu pour les faibles facteurs de charge. Il s'ensuit que pour les installations à faible facteur de charge et surtout dans les pays où le combustible est bon marché, la solution thermique est la meilleure, tandis qu'on adoptera la solution hydraulique dans les contrées où le combustible est cher et le facteur de charge élevé ; les installations de Californie sont donc rationnelles. On admet aux Etats-Unis que le capital engagé par kW de pointe des installations hydroélectriques varie de 150 à 400 dollars suivant les conditions d'accumulation et de transmission, pour les installations thermiques, ces chiffres deviennent : 85 à 125 dollars, soit 100 dollars comme moyenne normale.

## II. — LIGNES A 220.000 V

L'augmentation de la capacité de transport autant que la longueur des lignes conduit actuellement à l'adoption de tensions de plus en plus élevées. Actuellement, la tension de 220 kV est la plus haute utilisée en Amérique.

Il existe trois lignes :

- a) de Big Creek à Los Angeles de 387 km (440 réseau total) ;
- b) de Pit River à Vaca Dixon (San-Francisco) de 325 km ;
- c) de Conowingo à Plymouth (Philadelphie) de 93 km.

### Considérations préliminaires

A 220 kV la perte par effet Corona est importante et ne devient acceptable que pour un conducteur de 2,5 cm de diamètre. Les conduc-

teurs ont dès lors une grande résistance mécanique et conduisent à des efforts sur les chaînes d'isolateurs bien plus élevés que ceux trouvés habituellement dans les lignes de moindre tension, il fallait donc perfectionner la fabrication des isolateurs avant de songer à construire de telles lignes.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques mécaniques des conducteurs de quelques lignes existantes :

| Section de la ligne                                        | Los-Angeles          |                        | San-Francisco          |                         |
|------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
|                                                            | Big Creek<br>à Eagle | Eagle-Rock<br>à Laguna | Pit N° 1 à<br>Round Mt | Round Mt à<br>Vacadixon |
| Nature du câble .....                                      | Al-acier             | Al-acier               | Al-acier               | cuivre                  |
| Section { pour l'aluminium .....                           | 306                  | 338                    | 263                    |                         |
| en m/m <sup>2</sup> { pour l'acier .....                   | 40                   | 44                     | 119                    |                         |
|                                                            |                      |                        |                        | 253                     |
| Section totale utile .....                                 | 346                  | 382                    | 382                    | 253                     |
| Nombre { Aluminium .....                                   | 54                   | 54                     | 42                     |                         |
| de brins { Acier .....                                     | 7                    | 7                      | 19                     |                         |
|                                                            |                      |                        |                        | 49                      |
| Poids au mètre en Kg. ....                                 | 1,15                 | 1,28                   | 1,67                   | 2,3                     |
| Diamètre en cm. ....                                       | 2,44                 | 2,54                   | 2,54                   | 2,31                    |
| Section du câble en cm <sup>2</sup> .....                  | 3,5                  | 3,8                    | 3,8                    | 2,54                    |
| Effort de rupture en Kg. ....                              | 12,700               | 16,500                 | 19,800                 | 15,200                  |
| Limite d'élasticité en Kg. ....                            | 7,200                | 11,400                 | 12,100                 | 7,750                   |
| Effort maximum de travail en<br>kg. m/m <sup>2</sup> ..... | 6,7                  | 8,45                   | 4,94                   | 4,94                    |

La portée économique adoptée pour la ligne Eagle Rock Laguna Bell et pour la ligne à double circuit Pit River est d'environ 370 m, les pylônes de la première ont même été calculés pour 380 m, mais on a conservé 245 m pour ceux de la deuxième afin de réduire l'effort sur les chaînes d'isolateurs.

Pour le calcul des pylônes à double circuit en alignement, on considère le cas de la rupture de 3 conducteurs d'un même côté ; ce cas est fréquent paraît-il surtout quand un conducteur supérieur tombe entre les 2 fils inférieurs.

Pour les pylônes à simple circuit en alignement, on considère le cas de la rupture de 2 conducteurs d'un même côté du pylône (méthode de la Pacific Gas C°).



Les pylônes d'ancrage ou d'arrêt sont prévus pour la rupture de tous les conducteurs d'un même côté et dans le cas de la traction maximum.

Les pylônes sont essayés à 50 pour cent de surcharge.

Le pylône est calculé en tenant compte d'une certaine inclinaison transversale maximum pour la chaîne d'isolateurs (généralement 30 à 45° sur la verticale).

Il faut s'assurer, pour chaque emplacement, que cette inclinaison n'est pas dépassée ; sinon, il pourrait se produire des amorçages entre ligne et pylône. Un exemple typique est le cas d'un pylône situé en contrebas des 2 pylônes adjacents. L'effort horizontal dû au vent n'est pas modifié, mais la charge verticale peut se réduire à presque rien et la chaîne d'isolateurs tend à s'incliner exagérément vers le pylône. On peut remédier à ce phénomène soit par un agrandissement du pylône, soit par l'emploi d'une chaîne supplémentaire d'ancrage.

Le cas s'est fréquemment présenté sur la ligne 220 kV de Pit River et l'emploi de pylônes plus élevés a presque partout résolu la question de la manière la plus économique.

Le massif est généralement en béton ou constitué de traverses d'acier ; presque toujours l'acier est seul employé pour les pylônes d'alignement et le béton pour les pylônes d'angle ou d'arrêt.

A titre exceptionnel, le bois a été employé ; des poteaux ont été utilisés sur un circuit de la ligne Hat Creek-Cottonwood. On construisit cette ligne en 1921 parce qu'on n'avait pas pu obtenir livraison des pylônes en temps voulu.

Le tableau page 36 compare les caractéristiques des trois réseaux actuels.

### Ligne de Big Creek à Los Angeles

La Southern California Edison Co avait acquis en 1917 le réseau à double circuit de Big Creek, construit pour une tension de 150 000 volts et qui, en 1922, atteignit sa puissance maximum de 150 000 kW.

La demande d'énergie continuant à croître énormément, on fut obligé, soit de doubler la ligne existante à 150 000 V, soit de la transformer en ligne à 220 000 V, ce qui doublait sa capacité de transport. Cette deuxième solution, conduisant à une économie de 7 000 000 de dollars sur la première, fut adoptée. La grosse difficulté résidait dans l'obligation d'effectuer tous les travaux sans interrompre le service.

On devait augmenter la hauteur des pylônes afin de placer les câbles

4 9,15 mètres au-dessus du sol, distance exigée par les règlements et ajouter deux isolateurs ainsi qu'un anneau de garde sur chaque chaîne. Il fallait aussi pour éviter les pertes d'énergie ne mettre hors service qu'une faible longueur de ligne au moment de la transformation. On profita de la présence de deux lignes pour ne mettre hors service, au moyen de sectionneurs que 28 kilomètres de ligne sur lesquels l'adjonction des isolateurs était faite très rapidement. Quant à l'exhaussement des pylônes, il fut réalisé sur les lignes sous tension sans interrompre le service. Tout ce travail de surisolement de 772 kilomètres de ligne fut effectué en 6 mois par 70 hommes.

## LIGNES A 220.000 VOLTS

|                                                               | Southern CE<br>Los-Angeles           | Pacific GEC<br>San-Francisco | Pensylvania PI<br>Philadelphie | Observations                                                             |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Longueur en Km ...                                            | 440                                  | 325                          | 93,5                           | lignes séparées<br>en montagne                                           |
| Nombre .....                                                  | 3 l. simple                          | 1 l. double<br>4 ultérieur   | 2 l. simples                   |                                                                          |
| Section m/m <sup>2</sup> .                                    | 382-500<br>Al-acier                  | 250 cuivre<br>382 al-ac.     | 402 Al-acier                   |                                                                          |
| Ecartement en m ...                                           | 6,50                                 | 6,50 à 7,50                  | 7,15 à 7,75                    |                                                                          |
| Portée moyenne en m.                                          | 350 à 380                            | 250 à 350                    | 350                            | à 4,85 m. du câble<br>enregistreur<br>sur tensions<br>fer plat, fusibles |
| Fondations ...                                                | fer goudronné et béton aux<br>angles | 250 à 350                    | id.                            |                                                                          |
| Isolateurs ....                                               | 12-13 et 18-20                       | 13-14 diam.<br>var.          | 12-14 14-16                    |                                                                          |
| Foudre .....                                                  | rare                                 | rare                         | fréquente                      |                                                                          |
| Fils de garde ..                                              | 1                                    | 0                            | 2 en Al-acier                  | avec 6 % perte                                                           |
| Parafoudres ..                                                | néant                                | néant                        | GEC° oxyde                     |                                                                          |
| Anneaux-garde                                                 | employés                             | employés                     | 2 modèles                      |                                                                          |
| Chutes en ligne                                               | 9 %                                  | 4 %                          | 2,5 %                          |                                                                          |
| Puissance par<br>ligne en kW...                               | 90.000                               | 100.000                      | 200.000                        |                                                                          |
| Puissance du<br>réseau en kW.                                 | 515.000                              | 440 000                      | 625.000                        |                                                                          |
| Moteurs synch. (kVA)                                          | 440 000                              | 160.000                      | 100.000                        |                                                                          |
| Téléphones ...                                                | haute-fréq.                          | haute-fréq.                  | ordinaire                      |                                                                          |
| Energie vendue en mil-<br>liards de kilowatt-<br>heures ..... | 1,427                                | 1,506                        | 2                              |                                                                          |

La transformation des installations existantes des barres omnibus intérieures, aux usines de Big Creek et à la sous-station d'arrivée

d'Eagle Rock, pour la tension de 220 kV, aurait obligé à reconstruire entièrement les bâtiments pour satisfaire aux écartements nécessaires, aussi préféra-t-on installer en ces divers points des groupes d'auto-transformateurs 150/220 kV qui font pour ainsi dire partie de la ligne sur laquelle ils sont branchés sans aucun appareil intermédiaire. Il existe un auto-transformateur par ligne, capable de la charge totale de l'usine dans laquelle il est installé. Tous les appareils de coupure sont placés du côté 150 kV sauf aux sous-stations intermédiaires Vestal et Magunden où sont installés des disjoncteurs à huile de 220 kV pour couper les lignes ou les relier entre elles.

Les enroulements des auto-transformateurs sont montés en triangle, livrant ainsi passage au 3<sup>e</sup> harmonique de la tension, ce qui évite tout effort exagéré sur l'isolement.

Si la question d'isolement des lignes est très importante, celle du rapport entre l'excitation des alternateurs et le fonctionnement de la ligne ne l'est pas moins.

Il est bien connu que le courant de capacité dans une ligne de transmission longue et peu chargée surexcite les alternateurs.

Dans le cas des lignes de Big Creek sous 150 kV, on a constaté qu'un des alternateurs de l'usine N° I alimentant 385 km de ligne à simple circuit, à la vitesse normale et sans excitation, voyait sa tension croître de 100 pour cent et sa puissance apparente était 126 pour cent de sa puissance de pleine charge, on a même relevé des surcharges en ampères de 150 et 200 pour cent.

Pour maintenir une tension constante dans ces conditions, il fut donc nécessaire d'alimenter la ligne par 2 ou plusieurs alternateurs en parallèle de façon à diviser ce courant de charge entre eux et à pouvoir tolérer une excitation positive suffisante pour stabiliser la tension des alternateurs et de la ligne.

C'est cette nécessité de réaliser des bonnes conditions de stabilité qui a conduit à ne pas prendre des alternateurs d'une puissance inférieure à 50 000 kW dans les plus récentes installations des usines de Big Creek.

Au cours du fonctionnement sous 150 kV des lignes de Big Creek, on constata d'assez nombreuses effluves, qui, d'après les essais de laboratoires effectués sur les chaînes d'isolateurs atteintes, ne semblèrent pas provenir d'isolateurs défectueux et dont la cause ne fut jamais éclaircie. On craignit de voir persister ces accidents sous 220 kV et

l'on installa des relais pour réduire au minimum leurs effets sur le réseau.

Ces relais sont de 2 sortes :

1° Relais actionnés par l'intensité dans le conducteur du neutre à la terre des transformateurs qui, agissant sur le circuit d'excitation de l'alternateur, fait momentanément baisser la tension au point voulu, l'arc en ligne s'éteint ainsi et les conditions redeviennent normales dès que le courant de terre cesse.

2° Relais actionnés par les courants de déséquilibre dans les sections de ligne pour isoler la section de ligne défectueuse du reste du réseau, éteignant de la sorte l'arc et permettant à la section ainsi isolée d'être immédiatement remise en service.

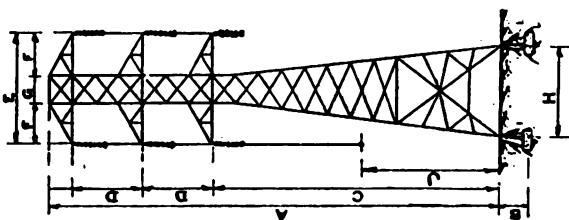
Les installations des postes extérieurs à 220 kW, faites à la sous-station de Lagune Bell et à l'usine N° 3, sont fort intéressantes. L'armature habituelle si complexe des postes en acier n'existe pas. Les barres omnibus principales, constituées par du tube de fer de 10 cm de diamètre sont supportées par des piliers isolants tripodes ou tétrapodes reposant eux-mêmes sur des petits massifs de béton directement implantés dans le sol. Les barres omnibus secondaires également constituées en tube de fer sont soudées aux barres principales et contre-fichées aux points d'attache. L'ensemble présente une construction solide et de hauteur modérée.

Actuellement, les trois lignes de la Southern C° transportent depuis les usines de Big Creek jusqu'à Los Angeles environ 300 000 kW jusqu'à divers postes abaisseurs situés à Vestal, Rector, Eagle Rock, Lagune Bell, Magunden, Lightipe. Le complément de puissance demandé par le réseau est assuré par l'usine thermique de Long Beach (100 000 kW environ en moyenne).

La capacité en moteurs synchrones installés est de 400 000 kVA, le réseau est divisé en trois zones séparées afin de limiter l'importance des court-circuits. On peut signaler à la sous-station de Lightipe 2 moteurs synchrones de 50 000 kVA.

Ce réseau dessert environ 2 500 000 habitants, 407 000 abonnés, la pointe est de 515 000 kVA pour 2 100 000 000 kWh vendus, soit une utilisation de 4 000 heures. Le facteur de charge qui est de 62 pour cent en hiver s'améliore à 72 pour cent en été du fait des nombreux pompages. Ce secteur investit chaque année environ 30 millions de dollars en moyenne pour extensions des usines et des réseaux.

Pylône à 6 conducteurs  
en cuivre acier de 252  $\frac{7}{32}$ "



Pylône à 3 conducteurs  
en aluminium acier de 261  $\frac{7}{32}$ "

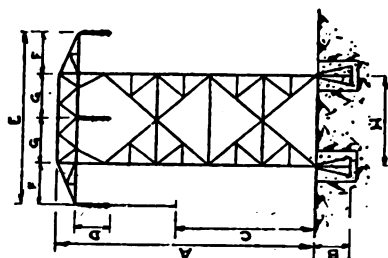


Fig. 4. — Ligne à 220 000 V. de Pitt River à Vaca-Dixon

### Ligne de Pit River à San Francisco

Les raisons qui décidèrent la « Pacific Gas and Electric C° » à utiliser la tension de 220 000 V pour transmettre l'énergie produite en ses usines du Pit River jusqu'à la sous-station de Vaca Dixon, poste d'arrivée à San Francisco, furent les suivantes :

Cette tension paraissait suffisamment élevée pour espérer que les progrès de la technique n'exigeraient aucun changement d'ici longtemps, la puissance maximum que cette tension permet de transmettre d'une manière économique est bien de l'ordre de grandeur de la puissance totale disponible dans le bassin du Pit River, le choix d'une tension plus élevée aurait conduit à des groupes générateurs trop gros, et à un nombre insuffisant de circuits pour garantir le bon fonctionnement du transport.

La ligne a 325 km de longueur ; la sous-station de Vaca Dixon est équipée pour 100 000 kVA ; elle abaisse une partie de cette puissance de 220 à 110 kV ; une autre partie de 220 kV à 55 kV (alimentation du réseau primaire de San Francisco)

L'importance des villes de San Francisco et Oakland avait primitivement nécessité l'installation de centrales thermiques qui sont maintenant utilisées comme secours en cas d'accident aux lignes 220 kV et qui également sont employées pour améliorer le facteur de charge des installations hydrauliques.

La puissance moyenne journalière du transport à 220 000 volts de la Pacific C° est de 200 000 kW avec une pointe de 275 000 kW, d'où un très bon facteur de charge.

La régulation n'a été reconnue possible qu'au moyen de condensateurs synchrones qui assurent la constance de la tension, la stabilité et la réversibilité sur les lignes de transport ; il y a 5 condensateurs synchrones installés à Vaca Dixon, 2 de 20 000 kVA et 3 condensateurs de 40 000 kVA.

Les chaînes d'isolateurs sont d'un modèle spécialement étudié.

Le type de chaînes d'isolateurs adopté est constitué (à partir de la traverse du pylône) par 9 isolateurs ordinaires de 25 cm de diamètre, 2 isolateurs doubles (composés chacun d'un isolateur à double cloche de 35 cm de diamètre et d'un isolateur à double cloche de 25 cm de diamètre placé au-dessous du précédent) et un bouclier constitué par un isolateur ordinaire recouvert de capots de cuivre, de 40 cm de diamètre, servant d'anneau de garde et de répartiteur de tension.

Cet ensemble constitue une chaîne de 2 m 15 de long environ, capable de résister à des tensions de 500 000 V.

Il existe une traversée remarquable à 220 000 volts sur le San Joaquin. La portée est de 1 260 mètres, à 6 conducteurs ; la flèche est de 76 mètres. Les pylônes ont 125 m de haut et peuvent supporter un effort au sommet de 9 tonnes.

En plaine, la ligne est supportée par des pylônes à double circuit, en pays montagneux par des portiques, car les surcharges verticales dues à la neige et au verglas sont considérables et les distances verticales entre conducteurs deviennent inadmissibles sur un seul support.

La tension de 220 000 volts est abandonnée à 96 kilomètres de l'Océan par suite des grandes difficultés causées par les brouillards et le sel marin, les parcours des lignes à 220 kV sont toujours tracés à l'abri de deux rangées de collines du côté de l'Océan.

La nouvelle ligne à 220 kV projetée sera prolongée jusqu'à San José au voisinage de la mer, mais on prévoit de l'équiper avec 18 à 20 isolateurs.

Les lignes ne portent pas de fils de garde à la partie supérieure et n'ont aucune protection par parafoudres ni sur 220 kV, ni sur 110 kV, la région est d'ailleurs calme au point de vue des perturbations atmosphériques et l'on n'a pas constaté d'accidents graves depuis 1923, on remplace 1 à 2 pour cent des isolateurs par an, les dérangements proviennent surtout des grands oiseaux.

La présence du sel marin au voisinage de la côte oblige à nettoyer deux fois par an les lignes à 110 000 volts, on essuie les isolateurs (manque d'eau). Les pylônes ont été galvanisés avec soin, on estime qu'ils dureront 40 à 50 ans.

L'agglomération desservie par le secteur renferme environ 1 million d'habitants, la pointe de puissance atteint 440 000 kVA pour 1 500 000 000 kWh vendus, 80 pour cent de la charge rurale sont constitués par le pompage.

### Ligne de Conowingo à Philadelphie

Cette ligne de transmission de 93,5 km de long, qui transporte actuellement à la sous-station de Plymouth près de Philadelphie l'énergie produite à l'usine Hydro-Electrique de Conowingo sur le Susquehanna sera constituée lorsque tous les travaux seront terminés par 3 lignes à 220 kV sur pylônes à simple circuit, les conducteurs étant

disposés horizontalement. Deux de ces lignes sont construites actuellement, suffisant aux demandes présentes d'énergie.

L'emplacement de la sous-station de Plymouth, à 24 km environ au N. O. de Philadelphie, a été choisi par suite de la proximité des lignes de transmission 66 kV de la « Philadelphie Electric C° » qui alimentent Philadelphie et sa banlieue et aussi par suite des facilités d'interconnexion avec la « Pennsylvania Power and Light C° » et la Public Service Electric and Gas C° » de New-Jersey, cette dernière

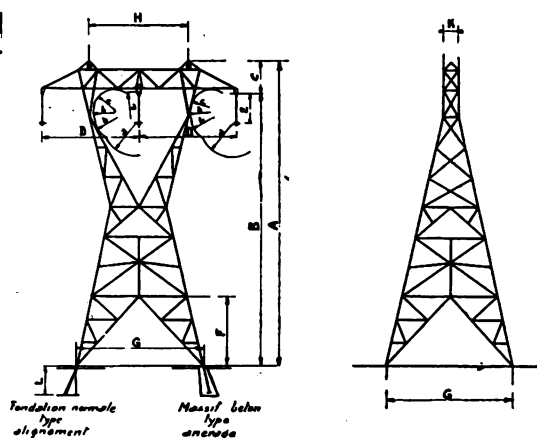


Fig. 5. — Ligne à 220 000 V de Conowingo à Philadelphie.

3 conducteurs aluminium acier de 403 mm<sup>2</sup>.

2 câbles de terre aluminium acier de 93 mm<sup>2</sup>.

A = 24,25 m

F = 5,50 m

B = 21,75 m

G = 10 m

C = 2,50 m

H = 7,15 m

D = 7,15 m

K = 1,295 m

E = 2,35 m

L = 2,10 m

Ecartement normal à la masse : a = 2,45 m

1<sup>er</sup> Ecartement accidentel b = 1,85 m

2<sup>e</sup> Ecartement accidentel c = 1,55 m

compagnie devant assurer dans l'avenir l'interconnexion avec les réseaux de New-York.

Après avoir déterminé le tracé général de la ligne, à la suite d'une reconnaissance effectuée sur les lieux mêmes, on dressa par photographies aériennes des cartes au 1/12 000 donnant les détails du terrain sur une bande de 2,5 à 5 km de large. Ces cartes servirent à déterminer un tracé plus rigoureux de la ligne et à préparer toutes les négociations en vue des expropriations nécessaires ; la distance horizontale entre conducteurs sur un pylône fut déterminée par l'écarte-



ment toléré entre le conducteur et le pylône, en tenant compte de l'inclinaison des chaînes d'isolateurs due au vent et aux angles ; on fut ainsi conduit à 7,75 m. On fixa ensuite à 26 m la distance entre

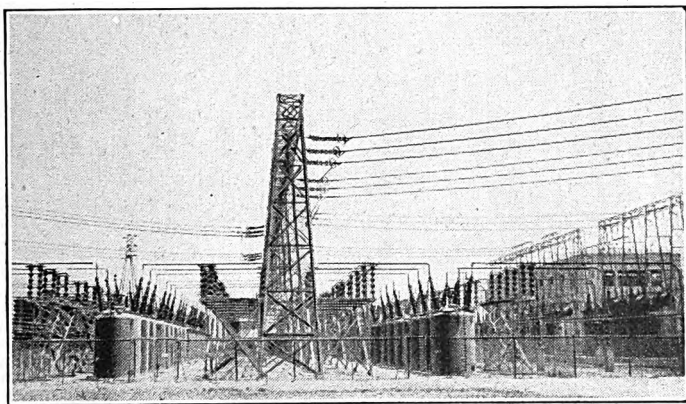


Fig. 6. — Poste de Plymouth.

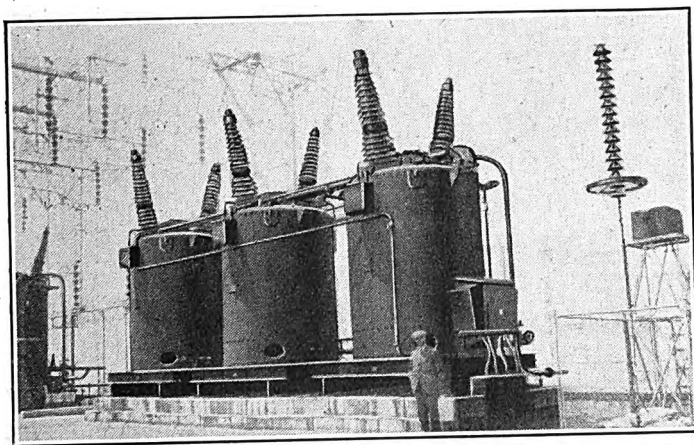


Fig. 7. — Poste de Plymouth.  
Disjoncteurs 220 kV et enregistreur de surtension.

axe des deux lignes voisines, ce qui conduit à 10,50 m entre deux conducteurs voisins de ces lignes, ces chiffres garantissent toute sécurité aux ouvriers travaillant sur une des lignes, l'autre étant sous tension.

En général, la ligne fut calculée en tenant compte d'une couche de

2,5 cm de neige. Pour réduire les efforts auxquels les pylônes pourraient être soumis dans certaines conditions anormales, on a utilisé une pince d'un type spécial (à relâchement) qui limite la différence des efforts dans le sens de la ligne à un maximum de 455 kg.

Les pylônes furent établis en se basant sur une chaîne d'isolateurs comportant au maximum 16 éléments et un appareil extincteur d'arc de 61 cm de largeur.

On calcula la hauteur économique des pylônes et la portée économique, en étudiant diverses valeurs de portée pour diverses valeurs de hauteurs admissibles de supports.

Dans le pylône type A, les conducteurs sont distants entre eux de 7,15 m. Il existe deux fils de terre disposés à 3,6 m de part et d'autre du sommet à 4,85 m environ au-dessus des conducteurs.

Le pylône s'élève sur une base carrée de 10 m en tronc de pyramide jusqu'à une certaine hauteur, à partir de laquelle il se partage en deux tronçons qui s'écartent pour faire place au conducteur médian : à leur extrémité supérieure, ces tronçons supportent une traverse qui soutient les chaînes d'isolateurs en ses deux extrémités et en son milieu.

Le corps du pylône est supporté par quatre jambes indépendantes ayant chacune leur massif et qui peuvent avoir dans le cas du terrain incliné des dimensions différentes.

L'implantation des supports se fait de deux façons normalement, chaque jambe se termine par un trépied en acier implanté dans le sol ; chaque pied a 2 m 10 de long dans les cas spéciaux, le trépied est noyé dans un massif de béton.

Il y a 520 pylônes y compris ceux de traversée du Susquehanna ; trois rotations ont été exécutées au  $1/6$ ,  $1/2$  et  $5/6$  du parcours.

Les conditions électriques conduisirent à employer un conducteur d'aluminium-acier de 402 mm<sup>2</sup>, d'un diamètre total d'environ 3,15 cm suffisant au point de vue de l'effet Corona.

On a choisi des fils de terre en aluminium-acier de même poids spécifique pour que les flèches des conducteurs soient les plus voisines possible dans tous les cas et aussi parce que deux couches de brins d'aluminium sur l'âme d'acier offrent une plus grande protection en cas de déséquilibre, d'orage ou de mise à la terre.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des câbles :

|                                       | Conducteurs                       | Câble de terre                    |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Section en m <sup>2</sup> .....       | 403                               | 93                                |
| Pourcentage d'acier.....              | 39,5                              | 73,4                              |
| Composition                           | 30 brins d'Al. de $\frac{41}{10}$ | 18 brins d'Al. de $\frac{23}{10}$ |
|                                       | 19 brins d'acier $\frac{25}{10}$  | 12 brins d'ac. de $\frac{31}{10}$ |
|                                       |                                   | 18                                |
|                                       |                                   | 0,294                             |
| Diamètre en millimètres.....          | 29                                | 11,650                            |
| Poids au mètre courant en Kg.....     | 0,560                             | 9,100                             |
| Charge de rupture du câble en Kg..... | 17,200                            |                                   |
| Charge limite d'élasticité.....       | 12,400                            |                                   |

Les chaînes d'isolateurs sont constituées d'éléments circulaires à haut isolement de 0 m 25 de diamètre espacés de 0 m 146. Tout fut prévu pour l'installation de 16 éléments dans le cas d'alignement et de 18 éléments dans le cas d'arrêt, mais on a seulement placé 14 éléments en alignement et 16 éléments dans le cas d'arrêt avec près du pylône un chaînon d'une longueur égale à 2 isolateurs, de telle façon que le conducteur se trouve dans la position correspondant à l'isolement de 16 ou 18 éléments.

Sauf en certains points de construction spéciale, le conducteur et le câble de terre sont supportés par des pinces à relâchement. Toutes les pinces sont en acier coulé galvanisé. De façon à réduire les vibration des pinces, celles-ci peuvent tourner dans un plan vertical autour d'un axe horizontal perpendiculaire au conducteur.

Les pinces à relâchement sont calculées de telle sorte que, pour un déséquilibre de charge correspondant à une inclinaison longitudinale de 20° de la chaîne d'isolateur, le mécanisme de relâchement fonctionne complètement. Le conducteur est alors uniquement maintenu par frottement dans la selle de la pince ; l'emploi de ces pinces réduit la charge longitudinale résultant de la rupture d'un conducteur, laquelle ne dépasse pas 2 260 kg dans les conditions les plus défavorables.

Les deux tiers inférieurs des pylônes sont en acier, rivetés et enduits d'une peinture à base d'aluminium, le tiers supérieur est en acier

galvanisé, boulonné ; on a évité ainsi toute partie peinte à proximité des conducteurs.

Les lignes de la Pennsylvania Power and Light C<sup>o</sup> se trouvent dans une région tout spécialement exposée aux phénomènes violents de la foudre, par suite du passage des orages et cyclones formés dans la mer des Antilles ; aussi, à l'inverse de ce qui se passe en Californie. on a dû protéger soigneusement les lignes. Deux fils de terre au-dessus des conducteurs, des parafoudres G E C<sup>o</sup> à oxyde de plomb n'ont pas suffi à assurer la protection. Durant les premiers six mois de fonctionnement, de nombreux incidents de foudre se sont produits sur le réseau ; on a dû ajouter des anneaux de garde sur les chaînes d'isolateurs, ils sont de deux sortes, ronds sur une des lignes, ovales en fer plat sur l'autre et ont notablement amélioré le service.

Cependant les phénomènes violents subsistent et la Pennsylvania C<sup>o</sup> a installé sur ses lignes des appareils enregistreurs de surtension constitués par des oscillographes cathodiques, placés sur les deux derniers éléments d'une chaîne montée entre conducteurs et terre, afin d'étudier les incidents qui se produiront en exploitation. M. W. Lewis, de la G E C<sup>o</sup> a décrit ces essais dans le rapport N<sup>o</sup> 54 présenté à la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques en 1929.

### III. — USINES DU BIG CREEK

Les premiers travaux hydrauliques sur le Big Creek affluent du fleuve San Joaquin furent commencés en 1911, actuellement le total des installations hydrauliques atteint 500 000 chevaux répartis dans cinq usines.

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| Usine N <sup>o</sup> 1 . . . . . | 110 000 ch |
| » N <sup>o</sup> 2 . . . . .     | 88 500 »   |
| » N <sup>o</sup> 2a . . . . .    | 107 200 »  |
| » N <sup>o</sup> 8 . . . . .     | 72 500 »   |
| » N <sup>o</sup> 3 . . . . .     | 115 000 »  |

Les premières usines N<sup>o</sup> 1 et 2 furent aménagées difficilement à l'altitude de 2 100 mètres en créant une réserve de 55 600 000 m<sup>3</sup> portée depuis à 110 000 000 m<sup>3</sup> sur le lac Huntington, on dut construire en 6 mois une voie ferrée à écartement normal de 90 kilomètres de longueur pour réaliser les travaux.

La réserve étant devenue insuffisante on dut utiliser le lac Florence en le reliant au lac Huntington par un tunnel de 21,5 km de longueur et de section  $4,50 \text{ m} \times 4,50 \text{ m}$  pour un débit de 65 mètres cubes. Le lac Florence fut lui-même surélevé par un barrage de 56 mètres portant le réserve à  $79\,500\,000 \text{ m}^3$ , enfin on utilisa un troisième lac, le lac Shaver de  $171\,000\,000$  de mètres cubes, qui alimente l'usine 2 A.

Les caractéristiques des diverses usines sont données ci-après :

*Usine N° 1.* — Située à BIG CREEK (ville) elle est équipée de quatre

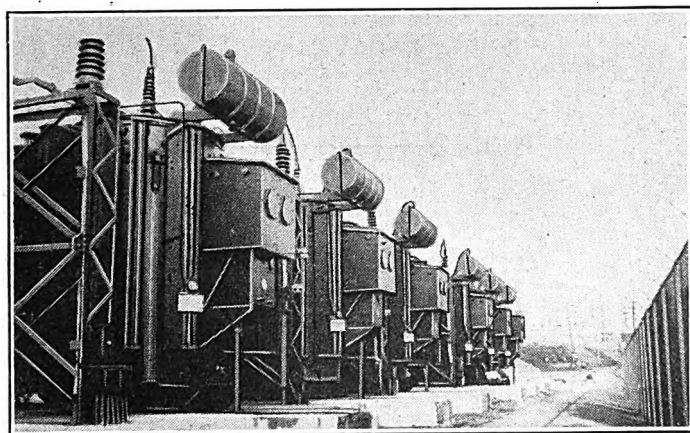


Fig. 8. — Usines du Big-Creek.  
Transformateurs monophasés à 220 kV.

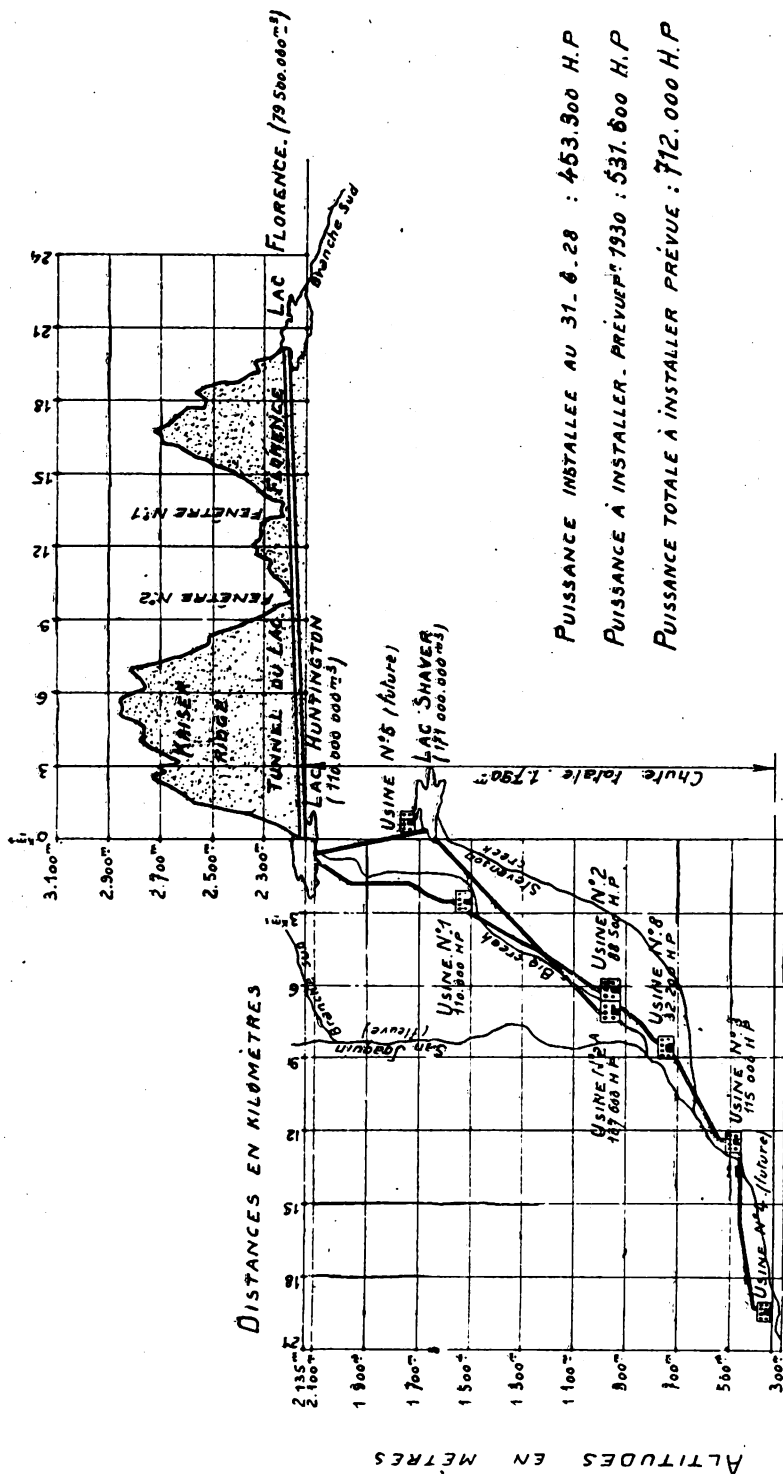
unités d'une puissance total de 110 000 ch fonctionnant sous une hauteur de chute de 650 mètres avec un débit d'eau à pleine charge et à réservoir plein de  $17,7 \text{ m}^3/\text{seconde}$ .

La tension des générateurs est de 6 600 volts et la tension de transmission originellement de 150 000 V est de 220 000 V depuis le 6 mai 1923.

*Usine N° 2.* — Située à BIG CREEK sur la rivière, au-dessous de l'usine N° 1, elle est équipée de 4 unités d'une puissance totale de 88 500 ch fonctionnant sous une hauteur de chute de 565 m et un débit d'eau à pleine charge de  $16,5 \text{ m}^3/\text{seconde}$ .

La tension des générateurs est de 6 600 volts et la tension de transmission à l'origine de 150 000 V est de 220 000 V depuis le 6 mai 1923.

INSTALLATION HYDRO-ELECTRIQUE DE BIG-CREEK. SAN-JOQUIN



PUISSANCE INSTALLEE AU 31-8-28 : 453.500 H.P  
 PUISSANCE A INSTALLER. PREVUE<sup>1930</sup> : 531.600 H.P  
 PUISSANCE TOTALE A INSTALLER PREVUE : 712.000 H.P

PUISSANCE À INSTALLER - PRÉVUE P<sup>1</sup> 1930 : 531.600 H.P

PUissance totale à installer prévue : 712.000 H.P

*Usine N° 8.* — Située au confluent du BIG CREEK et du SAN JOAQUIN, elle est équipée actuellement d'une unité de 32 200 ch et de 2 unités d'une puissance totale de 75 400 ch fonctionnant sous une hauteur de chute de 218 m.

La tension des générateurs est de 11 000 V et la tension de transmission 220 000 V.

*Usine N° 3.* — Située sur le SAN JOAQUIN au confluent du MILL CREEK, elle est équipée de 3 unités d'une puissance totale de 115 300 ch, fonctionnant sous une hauteur de chute de 252 m.

La tension des générateurs est de 11 000 V et la tension de transmission 220 000 V.

Les transformateurs 11 000-220 000 volts sont du type extérieur.

*Usine N° 2 A.* — Adjacente à l'usine N° 2, elle comprend 2 unités de 53 600 ch, fonctionnant sous 740 m de chute.

*Usine N° 4.* — Située sur le SAN JOAQUIN à 14,5 km en aval de l'usine N° 3, elle fonctionne sous une hauteur de chute de 116 m et aura une puissance de 67 000 ch.

| Années                                               | 1909       | 1914        | 1919        | 1927          |
|------------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|---------------|
| Installation en dollars.....                         | 24.033.239 | 32.548.486  | 91.066.716  | 259.666.676   |
| Puissance installée en ch.....                       | 51.600     | 114.600     | 298.400     | 816.100       |
| Bénéfice brut à la fin de l'exercice en dollars..... | 2.895.407  | 4.855.141   | 10.569.565  | 29.853.073    |
| Kilowatt heures vendus durant l'exercice.....        | 97.178.233 | 211.339.843 | 666.869.061 | 1.872.479.965 |
| Dividendes payés en dollars.....                     | 289.850    | 854.000     | 1.950.883   | 7.867.329     |
| Nombre d'abonnés                                     | 44.445     | 108.439     | 214.528     | 369.548       |
| Puissance connectée en ch. Lumière.....              | 60.258     | 122.005     | 251.395     | 381.534       |
| Force.....                                           | 48.296     | 136.284     | 392.799     | 1.191.158     |
| Puissance totale reliée.....                         | 108.554    | 258.289     | 644.194     | 1.572.692     |

*Usine N° 5.* — Située à l'extrémité du tunnel Huntington Shaver, elle fonctionne sous une hauteur de chute de 475 m environ et aura une puissance de 110 000 ch.

Le nombre total d'ouvriers employés sur les chantiers a varié de 600 à 5 000 au cours des 5 dernières années, actuellement 3 000 hommes y sont employés.

La Southern California C° a été formée par la fusion de trois compagnies et le rachat de dix autres compagnies plus petites, le tableau page 49 indique le développement de son exploitation de 1909 à 1927 :

Les différents travaux complémentaires permettront de porter la puissance totale des installations à 710 000 ch, on estime qu'à ce moment l'installation hydraulique totale, y compris les lignes de transmission, aura coûté 375 millions de dollars, soit 9 600 000 000 de francs.

#### IV. — USINE DU PIT RIVER

Les premières installations sur le Pit River comprenaient, en 1923, trois usines d'une puissance totale de 95 000 kVA auxquelles fut ajoutée, en 1925, une quatrième usine ; elles ont les caractéristiques suivantes :

|                      |            |
|----------------------|------------|
| Pit N° 1 .....       | 70 000 kVA |
| Hat Creek N° 1 ..... | 12 500 »   |
| Hat Creek N° 2 ..... | 12 500 »   |
| Pit N° 3 .....       | 81 000 »   |

Les usines Hat Creek N° 1 et N° 2, placées l'une au-dessous de l'autre, sont alimentées au fil de l'eau par la rivière Hat Creek, qui se jette dans le Pit River à l'altitude de 850 m.

Située en amont du confluent, l'usine Pit N° 1 est alimentée par une dérivation faite sur un affluent supérieur.

A l'aval du confluent du Hat Creek, on a construit un barrage déversoir de 35 m de hauteur formant une retenue de 40 millions de mètres cubes de capacité pour alimenter l'usine Pit N° 3.

Les caractéristiques des diverses usines sont données ci-dessous.

*Usine Hat Creek N° 1.* — Elle est équipée d'une turbine à axe vertical de 15 000 ch fonctionnant sous 65 m de chute et 17 m<sup>3</sup>/s.



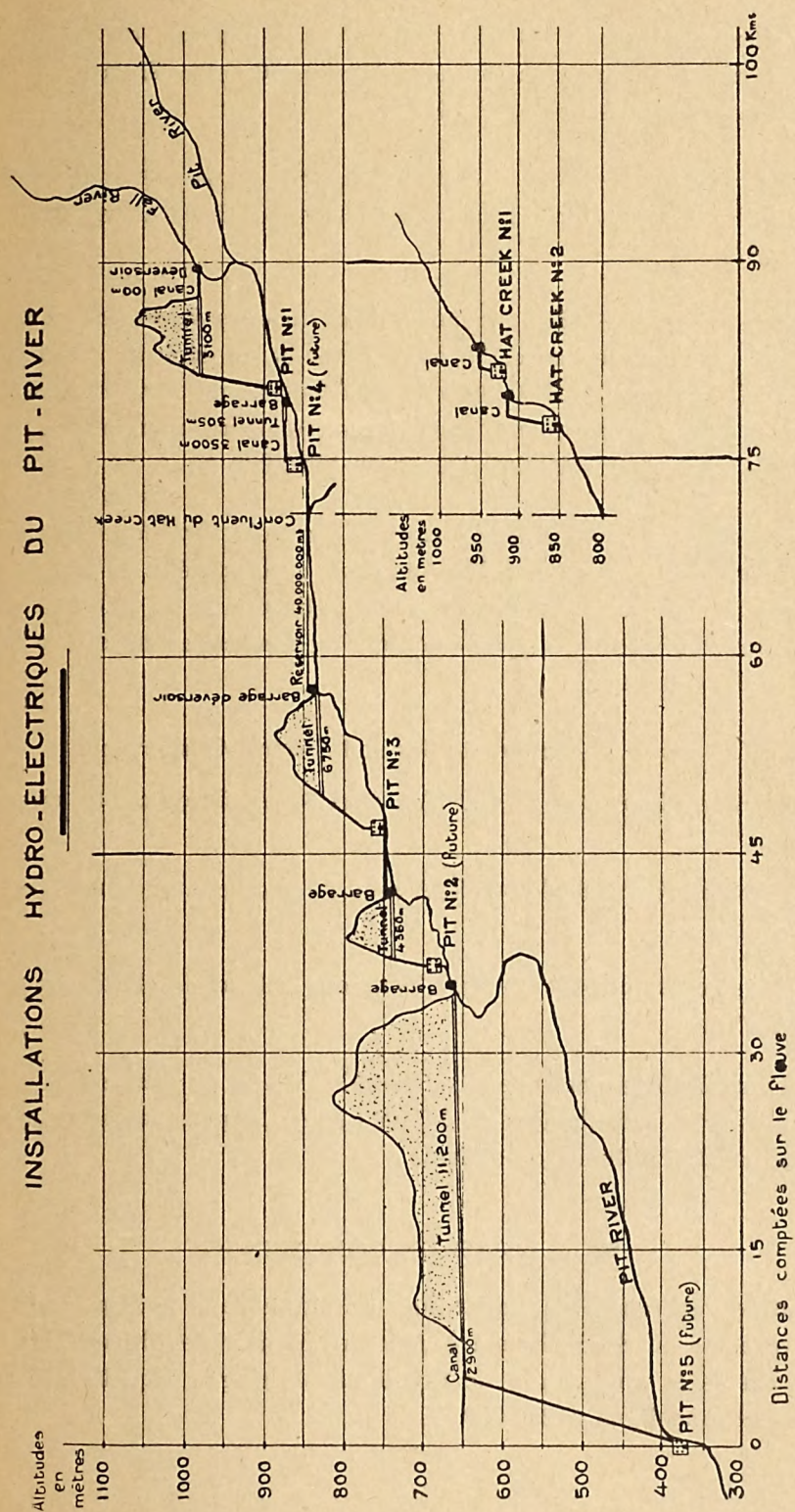


Figure 10.

L'alternateur de 12 500 kVA à 6 600 volts alimente un groupe de trois transformateurs monophasés 6 600/60 000 volts débitant sur une ligne de jonction à l'usine Pit N° 1.

*Usine Hat Creek N° 2.* — Elle est équipée de la même façon que l'usine N° 1, mais fonctionne sous 53 m de chute et un débit de 22,7 m<sup>3</sup>/s.

*Usine Pit N° 1.* — Elle comporte deux turbines de 40 000 ch à axe vertical, fonctionnant sous 138 m de chute et un débit de 51 m<sup>3</sup>/sec.

Les alternateurs de 35 000 kVA, à la tension de 11 000 volts, alimentent deux groupes de trois transformateurs monophasés de : 16 300 kVA-11 000 volts/125 000-175 000-220 000 V.

*Usine Pit N° 3.* — Elle est équipée de trois turbines Francis de 33 000 ch fonctionnant sous 86 m de chute avec un débit de 28,3 m<sup>3</sup>/s.

Les alternateurs de 27 000 kVA sont à la tension de 11 000 volts. Les transformateurs sont du type extérieur monophasé et élèvent la tension à 220 000 volts.

*Usine en projet.* — La Pacific Gas and Electric C° a projeté :

— l'usine Pit n° 4 de 15 000 kVA sous 36 m. 50 de chute, en aval de Pit n° 1 ;

— l'usine Pit n° 2 de 60 000 kVA sous 70 m de chute, en aval de Pit n° 3 ;

— l'usine Pit n° 5 de 250 000 kVA sous 250 m de chute, en aval de Pit n° 2.

Ces installations porteraient à 500 000 kVA la puissance totale du bassin du Pit, actuellement de 175 000 kVA, lesquels investissent un capital de 227 millions de dollars.

## V. — USINE DE CONOWINGO

L'usine génératrice de Conowingo est située dans le Maryland sur la rive ouest du Susquehanna à 105 km environ de Philadelphie et à 93 km de la sous-station de Plymouth Meeting à laquelle elle est reliée par une ligne à 220 000 V.

Sur la côte Atlantique, après celui du Saint-Laurent, le bassin du Susquehanna est le plus important.

L'étude du régime du fleuve et celle des demandes d'énergie ont conduit à prévoir l'installation pour une production maximum d'environ 400 000 kW, correspondant à un débit de 1700 m<sup>3</sup>/s.

Quand cette puissance totale sera installée, on escompte une économie annuelle de 750 000 tonnes de charbon.

On a étudié les possibilités d'interconnexion de l'usine de Conowingo avec les réseaux voisins de la « Pennsylvania Power and Light Co » et de la « Public Service Electric and Gas Co » pour réduire au minimum les frais d'exploitation de chacune de ces compagnies.

Le réservoir constitué par le barrage à un peu plus de 22 km de long, sa largeur variant de 800 à 2 000 mètres. On peut emmagasiner une quantité d'eau correspondant à la production de 5 000 000 kWh. La hauteur de chute disponible est de 27 m environ.

### Barrage et ouvrages de prise d'eau

Le barrage est en béton, du type à gravité, d'une longueur totale de 1410 m. Sa crête déversante est à 26 m d'altitude, le lit de la rivière étant à la cote 4 m en moyenne.

Sur une vue en plan de l'installation, on trouve successivement a partir de la rive Ouest, une culée d'environ 30 m de long ; l'usine de 290 m. et les ouvrages de prise d'eau, les 3 vannes de régulation, le déversoir de 685 m, la culée Est d'environ 365 m de long.

Le barrage et l'usine sont construits sur le rocher à l'altitude moyenne de 3,6 m pour le barrage et de 2,1 m pour l'usine.

Le déversoir présente la caractéristique assez spéciale de posséder une crête surplombant le parement amont, cela a permis de donner au parement aval, sans avoir besoin d'augmenter la largeur du barrage au delà de la valeur nécessaire à sa stabilité, la forme qu'aurait, en écoulement libre, la partie inférieure de la couche d'eau qui passerait sur le déversoir semblable en mince paroi.

La crête supporte 50 vannes mobiles du type Stoney, de 6,90 m de haut sur 12,5 m de large coulissant dans des glissières pratiquées dans les piliers de béton du barrage. Pour parfaire la régulation, trois vannes sont prévues près de l'usine sur une crête secondaire à 30 m d'altitude ; ces vannes ont 3 m de haut sur 12,5 m de large.

On a calculé le déversoir pour une pression de la glace de 6 000 kg par mètre courant de piliers de béton. On a prévu un dispositif en-

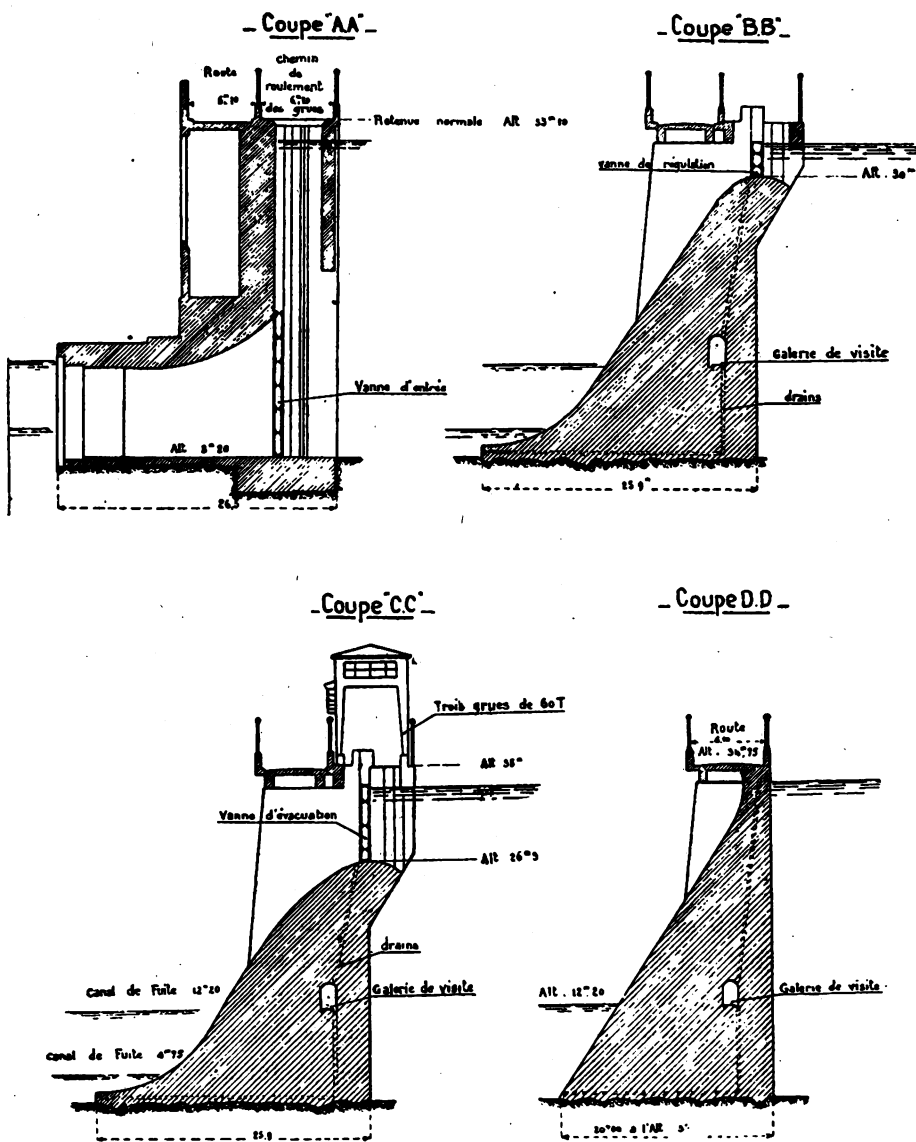


Figure 11. — Coupe du barrage.

voyant de l'air comprimé sous la surface amont des eaux, pour empêcher la formation de gros glaçons contre les vannes. Des éléments de chauffage électrique ont été installés dans les glissières. Les piliers

USINE DE CONOWINGO

Plan général

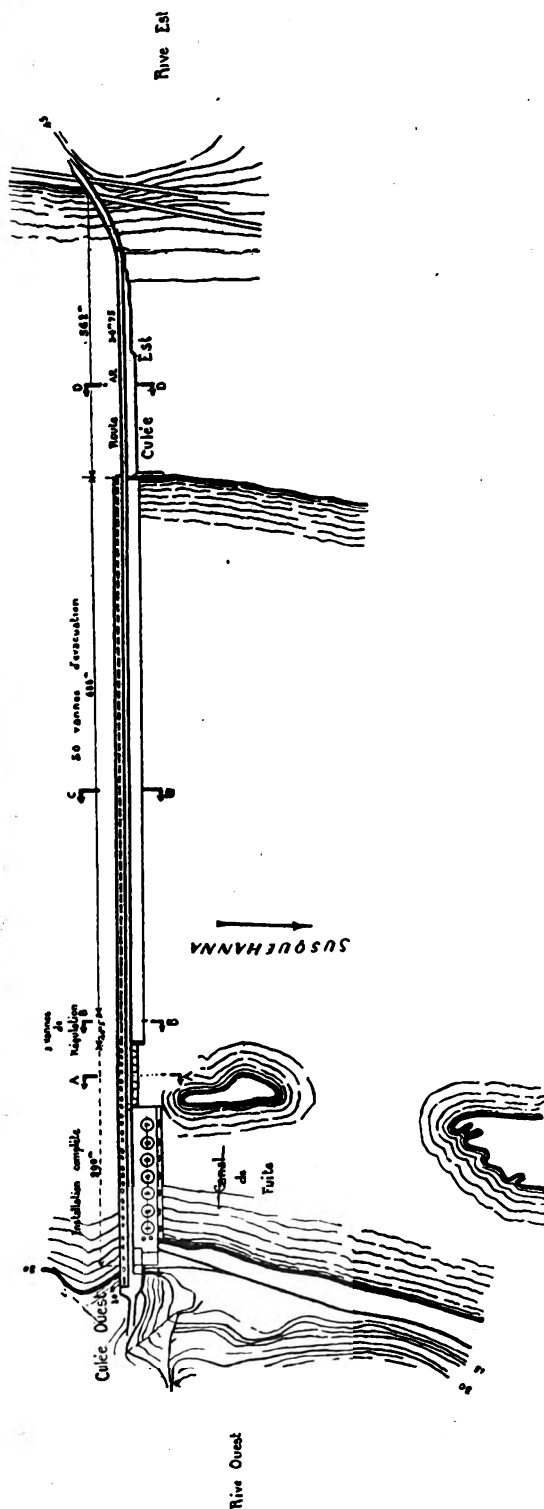


Figure 12.

pour les vannes, distants de 13,70 m dépassent le niveau du réservoir et supportent une passerelle tout le long du déversoir. Trois ponts roulants mûs électriquement peuvent actionner toutes les vannes ainsi que les grilles de retenue de l'usine.

Ces piliers de béton supportent aussi un pont faisant partie de la route nationale qui va de Philadelphie à Baltimore.

Les parties déversantes correspondant aux trois vannes de régulation et à 29 des vannes Stoney sont munies d'un tablier légèrement incliné sur l'horizontale, ceci pour éviter l'érosion du seuil. Des essais, effectués sur un ensemble déversoir-tablier indiquèrent que l'érosion maximum se produisait à 46 m du seuil et pouvait atteindre une profondeur de 7,6 à 9,1 m sous le lit du fleuve, tandis que l'érosion était pratiquement nulle au bout du tablier.

Les ouvrages de prise d'eau furent construits à gravité afin d'avoir une stabilité propre indépendante de celle de la construction de l'usine.

La face amont des ouvrages de prise d'eau est protégée par un mur en béton armé pénétrant dans le réservoir sur une profondeur de 12 m pour empêcher que la glace et les corps flottants ne pénètrent dans les canaux d'amenée de l'eau aux turbines.

### Canal de fuite

L'eau après passage dans les turbines, se déverse dans le fleuve, en aval de l'installation, au moyen d'un canal de fuite qui longe la salle des machines et pour la construction duquel on fut obligé de creuser le lit du fleuve plus de 100 m en aval de l'usine.

### Bâtiments de l'usine

L'usine est située à l'ouest et légèrement en aval du déversoir, elle fait partie intégrante du barrage. Sa largeur totale est de 53,5 m et sa longueur actuelle de 200 m qui atteindra 290 m quand tous les groupes seront installés.

Les fondations sont en béton armé.

On fut obligé de creuser jusqu'à 6,25 m au-dessous du niveau de la mer à l'emplacement des conduites d'évacuation.

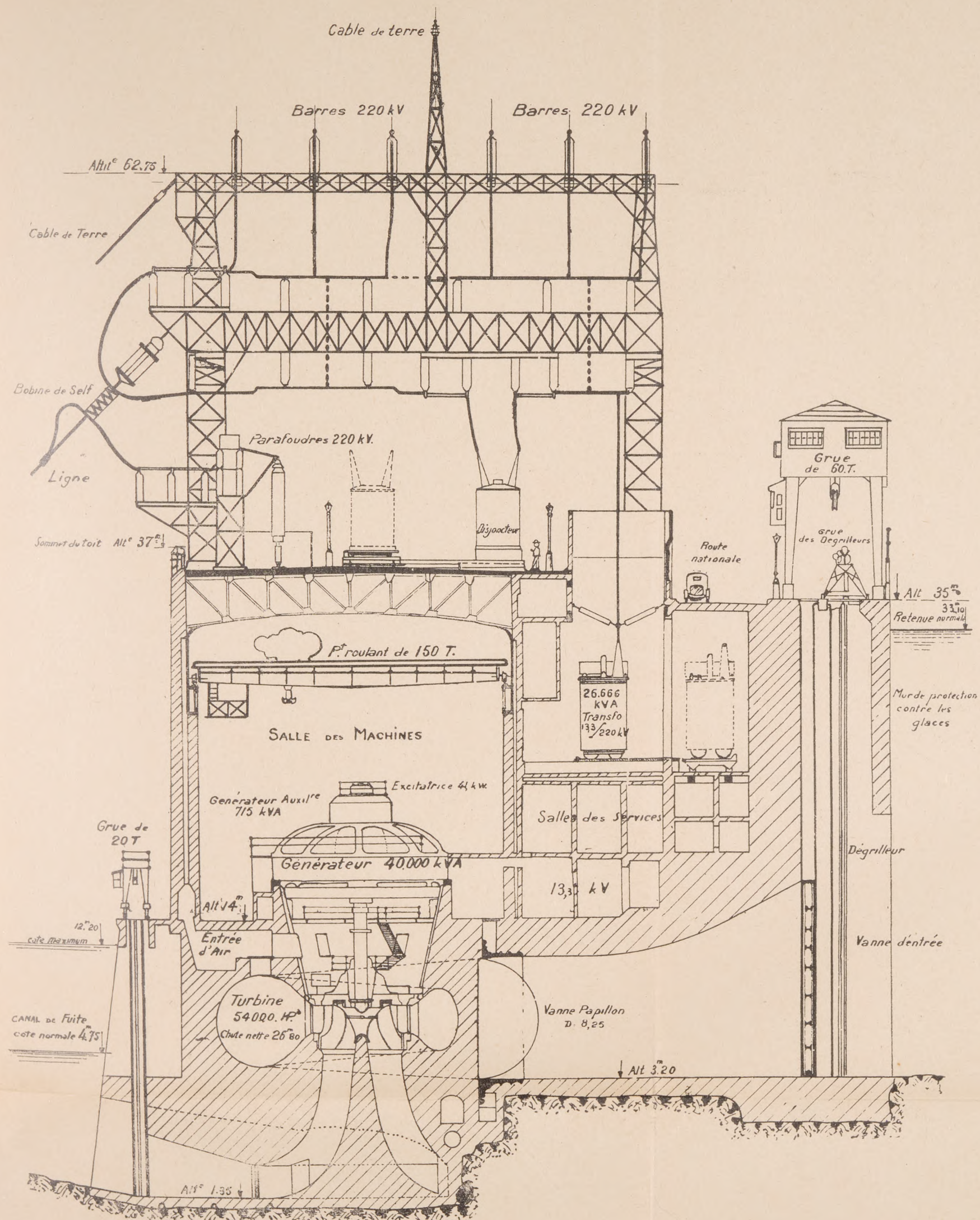
L'installation comprend :

La salle des machines qui a environ 21,5 m de large, 23 m de haut et 200 m de long.



# USINE DE CONOWINGO

## Coupe transversale









Un bâtiment à 2 étages, situé entre cette salle et les ouvrages de prise d'eau, qui contient les barres omnibus à 13 800 volts et les cellules de couplage.

Sur le toit de ce bâtiment sont situées les cellules des transformateurs élévateurs et les salles des tableaux d'où on voit directement la salle des machines.

Le toit de cette dernière salle est surmonté d'une charpente métallique de 27,5 m de haut, constituant le poste de coupure 220 kV ; le toit est en béton armé supporté par des armatures d'acier.

Le chemin de roulement des deux ponts de 150 tonnes est supporté par des colonnes d'acier indépendantes du bâtiment. Un emplacement de montage a été réservé à l'extrémité ouest de l'usine pour l'assemblage des grosses pièces. Une voie normale permet d'amener le matériel à l'atelier situé près de la salle des machines.

### Equipement mécanique

1° *Turbines.* — L'installation actuelle comprend 7 turbines à axe vertical de 54 000 ch, 27 m de chute et 81,8 tours par minute : 3 ont été construites par « I. P. Morris C° » et 4 par « Allis Chalmers Mfg C° » avec leurs régulateurs, vannes-papillon et tubes d'évacuation ; toutes les unités ont même apparence extérieure.

On a choisi des bâches en acier soudé et non en béton à cause de la grande économie ainsi réalisée dans les travaux de génie civil.

Le démontage se fait par le haut.

Le diamètre maximum du rotor est de 5,45 m et son poids total d'environ 110 tonnes. Chaque arbre est en acier forgé de 91 cm de diamètre, venu de forge avec tous ses collets.

Pour chaque groupe, on a dû installer un support entre la turbine et l'alternateur ; il est fixé au distributeur et supporte le générateur, le pivot du groupe et un plancher intermédiaire. Il transmet cette charge aux fondations par le distributeur sur lequel il s'appuie ; ce support est en acier et non en fer coulé comme d'ordinaire : il est indispensable, car il aurait été très difficile de construire un massif en béton pour le générateur dans le même espace.

En plus des 7 turbines principales, il existe 2 turbines de 19 000 ch pour les services auxiliaires de l'usine. Ils ont été construits par « Morgan Smith C° » et sont semblables aux unités principales. Tous les groupes sont indépendants.

2° *Vannes-papillon*. — La section d'entrée des canaux d'amenée est d'environ 177 m<sup>2</sup> par unité.

En plaçant une vanne-papillon à l'entrée de la bêche-spirale, la surface à fermer n'est que de 53 m<sup>2</sup> et le périmètre à maintenir étanche de 26 m. On a choisi des vannes-papillon de 8,25 m de diamètre, du type circulaire à axe vertical.

L'ouverture totale est obtenue en 5 minutes, et aussi la fermeture même pour le débit maximum.

L'étanchéité de chaque valve est obtenue par admission d'air sous pression dans un tube élastique de 7,5 cm de diamètre posé dans la section de fermeture de la valve. On réalise ainsi un joint qui rend les fuites négligeables.

La commande de chaque vanne est obtenue par pression d'huile dans un cylindre de 1 m de diamètre. Ces vannes sont les plus grosses de ce genre.

3° *Tubes d'évacuation*. — Les turbines Morriss ont des tubes d'évacuation du type ordinaire Mody avec un cône d'aspiration en béton. Les turbines Allis Chalmers sont munies d'un cône White.

La partie supérieure du tube d'évacuation est occupée par cinq aubes en acier coulé réparties sur la section circulaire du tube.

Sous ces aubes, le tube est divisé en deux par une paroi centrale.

Les turbines étant disposées au-dessous du niveau normal du canal de fuite, il a fallu pour permettre la visite du rotor installer des vannes à l'aval du tube d'aspiration ; ainsi les groupes peuvent être mis à sec quand ils ne sont pas en Service. Ces vannes comme les vannes d'entrée sont soulevées par un pont roulant.

4° *Régulateur*. — Ils sont du type ordinaire à boules, à pression d'huile et sont directement actionnés par l'arbre de la turbine.

5° *Vannes du déversoir*. — Il y a 50 vannes du type Stoney de 6,90 m de haut sur 12,50 m de large.

Les vannes permettent un débit total de 22 600 m<sup>3</sup>/s, soit 452 par vanne.

Trois vannes plus petites capables d'un débit égal à 151 m<sup>3</sup>/sec. permettent de parfaire la régulation.

En amont de toutes ces vannes sont prévues des glissières destinées à recevoir éventuellement une vanne de secours quand la vanne normale doit aller en réparation.

Toutes ces vannes sont manœuvrées par trois ponts roulants qui servent aussi aux vannes d'entrée et de sortie et aux grilles. Les vannes soulevées sont retenues par des linguets qui servent de butée.

Le temps nécessaire à un pont pour monter une vanne et être prêt à en monter une seconde est de 9 minutes. Les crues enregistrées jusqu'à présent ont obligé au levage d'une vanne toutes les 30 minutes seulement.

6° *Grilles et vannes de secours.* — Le seuil de la prise d'eau de chaque turbine est situé un peu au-dessus du fond de la rivière à cet endroit ; en amont des seuils se trouve un mur qui les protège de la glace.

Les grilles de retenue des corps flottants sont situées sur chaque prise d'eau à l'aval du mur de protection et de façon à permettre le fonctionnement d'un dégrilleur automatique.

Les vannes d'entrée de secours sont en acier et utilisées pour fermer les canaux d'amenée quand les vannes papillon employées normalement sont hors de service.

7° *Ponts roulants.* — Les vannes d'entrée de secours et les grilles sont mues par des ponts roulants mobiles le long du barrage. Ces ponts sont équipés d'un organe élévateur spécial se fixant automatiquement à un panneau de dégrilleur ou de vanne sous l'eau, de manière que chaque panneau puisse être hissé séparément et transporté à l'endroit voulu par les ponts.

Il y a en tout 3 ponts d'une puissance de 60 tonnes chacun et 2 monte-charges de 30 tonnes. Les ponts sont mûs électriquement et sur l'un d'eux existe un générateur actionné par un moteur à gaz comme secours.

Il y a 2 ponts roulants dans la salle des machines mûs par 4 moteurs électriques 440 volts et muni chacun d'un treuil principal de 150 tonnes et d'un treuil auxiliaire de 25 tonnes.

Un dispositif rend possible le fonctionnement simultané des 2 ponts pour transporter les pièces très lourdes.

Il existe aussi 2 ponts roulants de 50 tonnes pour la manutention des transformateurs.

### Équipement électrique

1° *Disposition générale des circuits 13,8 kV et 220 kV.* — Les 7 alternateurs de 40 000 kVA installés actuellement produisent l'énergie

sous la tension de 13 800 volts élevée à 220 kV par des groupes de transformateurs de 80 000 kVA.

La mise en parallèle s'effectue sur les barres omnibus 220 kV entre des groupes de 80 000 kVA constitués chacun par 2 générateurs et un transformateur ; une grosse économie est ainsi réalisée sur le prix des transformateurs.

L'installation complète comprendra 5 groupes semblables à 2 alternateurs, plus un groupe de 40 000 kVA seulement constitué par l'alternateur n° 11 et le transformateur n° 6.

Plus tard, si on veut opérer la mise en parallèle des groupes du côté 13 800 V on pourra interconnecter les barres omnibus B.T. soit à travers des réactances, soit directement constituant ainsi un circuit bouclé ou une barre simple. Les réactances pourront être mises en court circuit par des sectionneurs.

Actuellement, les alternateurs n° 3, 4, 5 et 6 peuvent être réunis par un disjoncteur à huile, d'où augmentation de souplesse pour ces quatre unités.

Plus tard, les générateurs n° 6 et 11 et les transformateurs n° 2, 3 et 5 pourront être reliés par un double jeu de barres quand le circuit bouclé 13 800 V sera constitué ; cela permettra l'essai d'une ligne 220 kV par un alternateur quelconque sans diminuer beaucoup la puissance transportée par les autres lignes.

Deux câbles connectés aux barres 13 800 V alimenteront un groupe de transformateurs destiné aux services auxiliaires ; deux autres câbles pourront être installés en vue d'alimenter les communes voisines.

Le poste 220 kV contient un double jeu de barres. Des disjoncteurs utilisés comme secours et situés aux extrémités du poste permettent de boucler les barres. Il y a un disjoncteur de secours sur les départs. Les sectionneurs sont commandés par moteur et verrouillés par un dispositif de sécurité.

2° *Services auxiliaires de l'usine.* — Ils sont alimentés par un réseau triphasé 440 volts et comprennent :

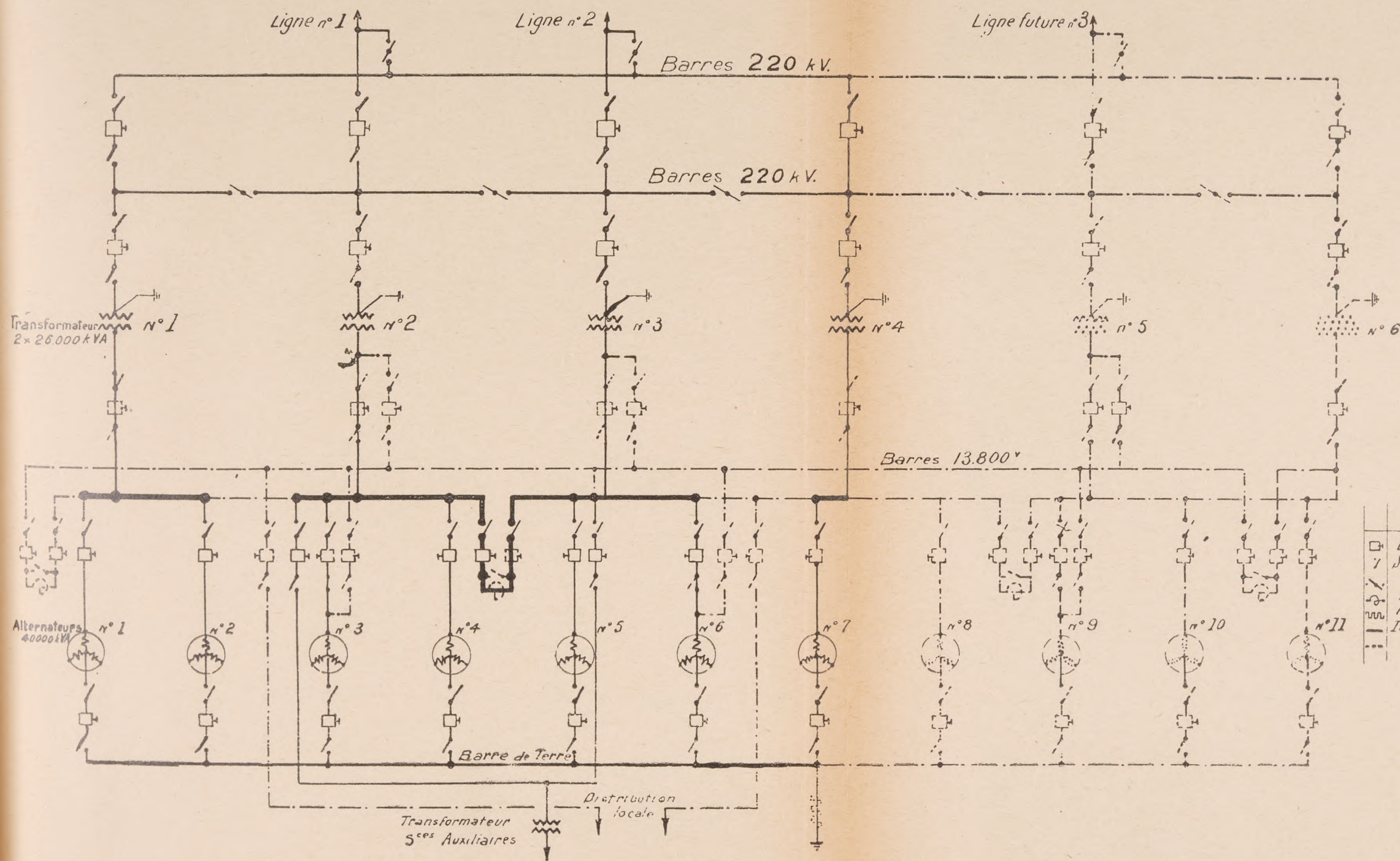
1° Les services auxiliaires principaux des groupes alimentés par des alternateurs montés, ainsi que leurs excitatrices, directement sur l'arbre des groupes principaux.

2° Les services auxiliaires secondaires et l'éclairage général, alimentés d'une part par deux turbo-groupes de 1 600 kVA et, d'autre part,



# Usine de Conowingo

## Schéma électrique



### —Légende—

|  |                       |
|--|-----------------------|
|  | Disjoncteur à huile   |
|  | Sectionneur à couteau |
|  | -d- a chariot         |
|  | Reactance             |
|  | Resistance            |
|  | Installation actuelle |
|  | -d- future            |





par un transformateur de 2 500 kVA connecté aux barres 13 800 V et relié du côté 440 V à un régulateur d'induction.

Les services auxiliaires principaux comprennent un groupe moteur générateur d'excitation, une pompe à huile pour le régulateur, un ventilateur.

Chaque pompe à huile alimente les régulateurs des 2 générateurs d'un groupe.

Le ventilateur est mis hors service quand on veut utiliser l'air chaud au chauffage de la salle des machines.

Pour tous ces services, il y a des câbles de secours connectés aux barres omnibus auxiliaires.

L'alimentation des services auxiliaires généraux de l'usine se fait à partir d'une barre omnibus unique divisée en 3 sections connectées chacune à un alternateur auxiliaire ou à un groupe de transformateurs, de manière à rendre les sections indépendantes.

Une excitatrice de secours est conduite par un moteur branché sur l'une de ces sections ; tout est prévu pour en installer ultérieurement une seconde.

Les divers moteurs situés dans l'usine sont alimentés dans presque tous les cas par 2 câbles connectés à des sections différentes ; les câbles d'alimentation normale sont connectés à la section alimentée par les groupes turbo-alternateurs et les câbles de secours à la section alimentée par le transformateur.

L'éclairage est fourni par 3 transformateurs monophasés 200 kVA, 440/110-220 volts. Le réseau lumière est divisé en 3 circuits indépendants ; chaque circuit est automatiquement branché sur une des 2 batteries d'accumulateurs de l'usine en cas de panne dans l'alimentation normale. Deux transformateurs de 20 kVA sont utilisés pour l'éclairage du pont sur le barrage. Un groupe de transformateurs dessert le village voisin.

*3° Excitation.* — Les groupes d'excitation des alternateurs principaux se composent : d'un moteur à induction de 375 ch, d'une excitatrice principale 240 kW, 250 volts et d'une excitatrice pilote 10 kW, 250 volts.

Les connexions avec sectionneurs sont établies de telle façon que l'excitatrice de chaque alternateur principal ou auxiliaire, puisse être faite par l'excitatrice normale ou par une quelconque des excitatrices de secours.

4° *Alternateurs principaux.* — Leurs caractéristiques sont les suivantes : 40 000 kVA,  $\cos \varphi = 0,9$ , 13 800 volts, triphasé 60 p: s ; 88 pôles, 81,8 t/mn.

Quoiqu'il en existe de plus puissants, ils sont, à cause de leur vitesse réduite, les plus gros qui aient jamais été construits ; ils ont

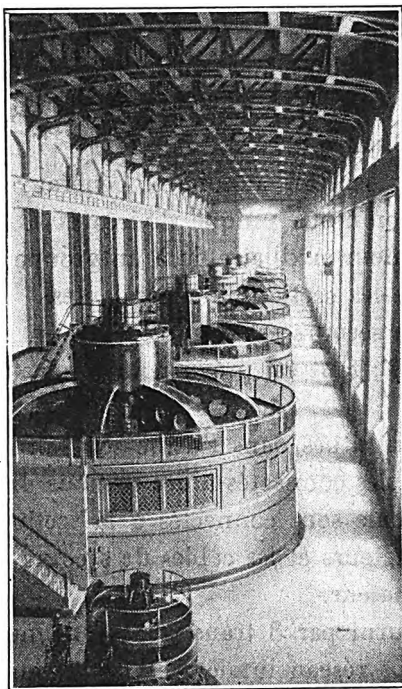


Figure 13. — Usine de Conowingo.  
Salle des machines.

environ 11,60 m de diamètre, 9,75 m de haut et pèsent avec le pivot, l'alternateur auxiliaire et son excitatrice, plus de 500 tonnes.

La charge sur le pivot, y compris la poussée de l'eau est de 544 tonnes.

Montée sur le même arbre et au-dessus du pivot, se trouve une génératrice de 715 kVA,  $\cos \varphi = 0,7$ , 440 V triphasé, 60 p: s et son excitatrice de 41 kW 250 V.

Quatre des groupes sont munis de pivots à ressort, et les 3 autres de pivots Kingsbury.

Provenant de 2 constructeurs différents, tous les groupes ont cepen-



dant les mêmes dimensions générales, ce qui donne un meilleur aspect à la salle des machines.

Les neutres des alternateurs principaux sont directement mis à la terre et munis de dispositifs de protection Merz-Price. Les neutres des alternateurs auxiliaires ne sont pas mis à la terre. Quinze indicateurs de température fonctionnent sur les alternateurs principaux.

5° *Transformateurs principaux.* — Chaque groupe d'une puissance de 80 000 kVA est constitué par 3 unités de 26 666 kVA connectées en étoile du côté 220 kV avec neutre à la terre, et en triangle du côté 13 800 V. Quatre de ces groupes sont installés actuellement de même qu'une unité de secours, soit 13 transformateurs en tout. Ils sont munis d'une prise sur l'enroulement haute tension à 7,5 pour cent et sont isolés pour 187 kV par rapport à la terre.

Ils sont refroidis par circulation d'eau provenant normalement du fleuve et s'écoulant par gravité dans les serpentins de réfrigération. Si le niveau de la retenue est faible, des moto-pompes refoulent l'eau dans les canalisations d'aménée.

Des galets permettent de rouler chaque transformateur sur un lorry qui l'amène sous un pont roulant, à l'extrémité ouest du bâtiment, pour le descendre au niveau de la salle des machines.

6° *Disjoncteurs à huile.* — Ceux employés sur les circuits 220 kV présentent les caractéristiques suivantes : 187 kV, 1.000 A. puissance de coupure : 2 500 000 kVA, 1 pôle par bac.

Les bornes de sortie sont munies de bushings d'où partent des circuits tension pour synchronisation, mesure et relais.

Les disjoncteurs employés sur les circuits 13 800 V sont du type 15 kV mais isolés en réalité pour 25 kV de même que les isolateurs et les transformateurs d'intensité. Les disjoncteurs des services auxiliaires sont de 2 000 A, ceux des barres omnibus de 4 000 A. Ils sont commandés par moteur et ont une puissance de coupure de 1 500 000 kVA. La partie de l'usine où ils sont situés est divisée en un certain nombre de cellules étanches, de manière à limiter les incendies. .

7° *Divers.* — Le poste 220 kV est le premier poste à cette tension équipé de parafoudres ; ceux-ci sont du type à pellicule d'oxyde.

Les communications sont assurées avec le dispatcher à Philadelphie par 2 lignes téléphoniques directes, il existe, de plus, des lignes allant à la poste locale.

La protection contre les incendies est assurée par : des conduites d'eau, des extincteurs au tétrachlorure de carbone, des extincteurs Foamite.

La salle des tableaux est située au milieu de l'installation au-dessus d'une salle de répartition du petit câblage secondaire.

On étudia particulièrement l'éclairage de cette salle pour éviter les réflexions gênantes sur les verres des appareils de mesure. Les lampes sont disposées au plafond, au-dessus d'un vitrage diffuseur.

Cette salle comprend : 3 tableaux demi-circulaires disposés l'un derrière l'autre. Sur le premier, du type pupitre, sont montées les commandes et lampes témoins des disjoncteurs des alternateurs principaux et auxiliaires et des transformateurs élévateurs, ainsi que les commandes de lampes-témoins des sectionneurs et disjoncteurs 220 kV.

Derrière ce pupitre, se trouve un tableau droit sur lequel sont montés les ampèremètres, voltmètres, wattmètres, indicateurs de puissance réactive des circuits principaux.

On étudia particulièrement la disposition des appareils de ces deux tableaux, de façon à rendre les commandes plus simples et plus précises.

Adossé au tableau des appareils de mesure, se trouve le tableau des relais de protection principaux. Le long des murs, il y a les tableaux de commande des alternateurs et transformateurs auxiliaires secondaires et les tableaux de régulation de tous les alternateurs.

Des sonneries électriques sont largement utilisées pour attirer l'attention des électriciens de service en toute occasion.

Le service d'huile comprend : une pompe par groupe, un accumulateur d'huile pour 2 machines, deux pompes de  $2,3 \text{ m}^3/\text{m}$ , 5 réservoirs de  $54,5 \text{ m}^3$  et un réseau très complet de tuyaux d'alimentation et de vidange.

Les travaux commencèrent le 8 mars 1926 ; les transports furent difficiles, l'ancien pont sur le Susquehanna ne permettait pas le passage de charges supérieures à 2,5 tonnes.

Sur la rive Ouest, il fallut construire 14,5 km de ligne pour se relier aux chemins de fer de Pensylvanie. Le 3 juin, elle fut inaugurée.

Le premier travail consistait à édifier le pont sur le barrage et à rétablir sur 13 km la route nationale : ils furent livrés à la circulation le 23 décembre 1926.

Le pont fut construit à une altitude suffisante pour ne pas être sub-

mergé pendant les crues dont l'évacuation fut tout spécialement étudiée ; l'étude des débits donnait comme valeurs extrêmes 62 et 22 200 m<sup>3</sup>/sec ; trois inondations ont noyé le chantier pendant les travaux ; la plus importante fut de 11,300 m<sup>3</sup>/sec.

Le barrage de Conowingo est le plus grand construit en béton.

Son cube total est de 332 000 m<sup>3</sup>.

La coulée commencée le 3 août 1926 fut terminée le 16 janvier 1928.

Le débit maximum en 24 h fut de 2 770 m<sup>3</sup> de béton.

Au début d'août 1927, 3 275 ouvriers travaillaient à l'usine et au barrage.

### Répartition des charges par « load dispatching ».

La répartition de la charge du réseau de la « Philadelphia Electric Co » et des réseaux connexes se fait par « load dispatching » au moyen d'un certain nombre de « dispatchers » dépendant des Compagnies intéressées.

Ceux du réseau de Philadelphie sont installés dans un bureau central au milieu de la ville. Un tableau du schéma du réseau indique l'appareillage principal et toutes les connexions.

Des enregistreurs et indicateurs donnent constamment tous renseignements utiles sur la charge des divers secteurs. Des lignes téléphoniques directes (72 privées, standard pour 800 lignes) et des postes de T. S. F. permettent au personnel d'être en liaison permanente avec les électriciens de service dans chaque usine ou poste, et avec les abonnés (certains mois on reçoit jusqu'à 10 000 appels en une heure).

Une certaine fraction de l'énergie thermique disponible est réservée pour fournir l'appoint en cas de panne d'une centrale hydraulique ou d'une ligne. Dans ce but, une turbine à vapeur assez puissante est toujours en service.

Quand le débit du Susquehanna est élevé, l'usine de Conowingo fournit l'énergie de base, les usines thermiques fournissent seulement l'appoint de la consommation ; quand le débit est faible, les usines thermiques fournissent l'énergie de base, Conowingo donnant les pointes et l'excédent de la consommation ; on réalise la meilleure marche économique.

On a tracé des graphiques de répartition des énergies thermiques et

hydraulique en fonction de la consommation et pour des débits variables.

De ces courbes, le dispatcher général déduit la répartition de la charge totale la meilleure après consultation des dispatchers voisins ; l'ensemble peut ainsi fonctionner dans les meilleures conditions d'économie.

### Exploitation de l'usine.

Le personnel compte en totalité 58 employés (environ le 1/4 du personnel nécessaire pour une centrale thermique de même puissance).

Pour l'exploitation actuelle, chaque équipe de quart compte 9 hommes, à savoir :

- 1 surveillant,
- 1 ingénieur,
- 3 graisseurs,
- 1 électricien de tableau,
- 1 aide électricien de tableau,
- 1 mécanicien-électricien,
- 1 électricien pour l'excitation.

En plus, il y a des ouvriers, concierges, gardes, etc...

Les célibataires ont une pension commune tenue par la Compagnie. Les ouvriers mariés sont logés dans des cités.

Les Ingénieurs sont logés dans des maisons individuelles ; l'ensemble forme un village qui est un modèle du genre.

L'usine de Conowingo pourra donner en année moyenne 1 250 millions de kilowatt-heures avec 7 machines ; on a déjà fait 2 à 2,5 millions de kilowatt-heures par jour.

L'installation a coûté 51 millions de dollars ; l'Etat a accordé une licence de 50 ans avec rachat à la fin de la concession ou prolongation de 10 ans en 10 ans.

Le prix de revient du kWh serait donc de 11 centimes environ pour la première étape comprenant 5 machines et de 8,5 centimes pour l'usine totale renfermant 11 machines.

Si l'on considère que le prix des charbons est de 5 à 5,5 dollars à Philadelphie, le prix de l'énergie hydraulique est sensiblement égal au prix de l'énergie thermique, mais on dispose de 5 millions de kWh

par le jeu de la réserve du barrage, qui permettent une grande souplesse d'exploitation.

Il est évident que l'usine de Conowingo, placée à peine à 6 mètres au-dessus du niveau de l'Océan, constitue un travail d'art très coûteux, mais sa construction est justifiée du fait que la région de Philadelphie qui comprend 3 millions d'habitants et 520 000 abonnés, absorbe actuellement 2 milliards de kilowatt-heures et possède dans toutes ses usines génératrices une puissance installée de 780 000 kW, fournissant une puissance de pointe de 625 000 kW.

On envisage d'ailleurs de développer très largement le réseau à 220 000 V, de le relier dès 1931 à New-York, puis ensuite à Washington et Baltimore, de sorte que la quantité d'énergie débitée sur ce réseau s'élèverait à plus de 20 milliards de kilowatt-heures ; l'usine de Conowingo débitant sur un aussi vaste réseau atteindra alors une parfaite utilisation. Cette grandiose installation qui peut sembler audacieuse, si près de l'embouchure du fleuve, est donc parfaitement justifiée.

### CONCLUSIONS

Nous venons d'exposer que trois agglomérations importantes des Etats-Unis sont desservies par de longues lignes à 220 000 volts, elles ont les caractéristiques ci-après :

|                   | Habitants<br>desservis | Abonnés | kWh vendus<br>milliards | Pointe<br>kW (1928) |
|-------------------|------------------------|---------|-------------------------|---------------------|
| Los Angeles....   | 2 500 000              | 407 000 | 1 427                   | 515 000             |
| San Francisco.... | 1 000 000              | —       | 1 506                   | 440 000             |
| Philadelphie....  | 3 000 000              | 520 000 | 2 000                   | 625 000             |

Dans les distributions de Los Angeles et de San Francisco, l'énergie annuelle produite est presque totalement hydraulique, la puissance thermique installée est de un quart environ de la puissance hydraulique, soit un cinquième du total. Le fait qu'en ces villes le service est parfait et ne présente pas d'irrégularités prouve suffisamment la bonne tenue des grands transports à 220 000 volts, dont la longueur atteint cependant 325 kilomètres et 387 kilomètres.

Il convient de remarquer cependant que les Américains prévoient

toujours largement les circuits de secours, San Francisco est alimentée par une ligne à 6 câbles en plaine et deux lignes en montagne, Los Angeles par trois lignes suivant des tracés différents. Philadelphie est actuellement alimentée par deux lignes à trois câbles dont le nombre sera augmenté ; la quantité d'énergie hydraulique distribuée est environ moitié du total annuel, le service est également parfait malgré les difficultés climatiques.

La transmission de l'énergie à la tension élevée de 220 000 volts est donc complètement résolue et mise au point ; à Los Angeles même, les lignes à 220 000 volts donnent moins de dérangements annuels que les lignes du littoral à 110 000 volts.

Ces considérations doivent nous donner tout apaisement au sujet du fonctionnement prochain du réseau français à 220 000 volts.

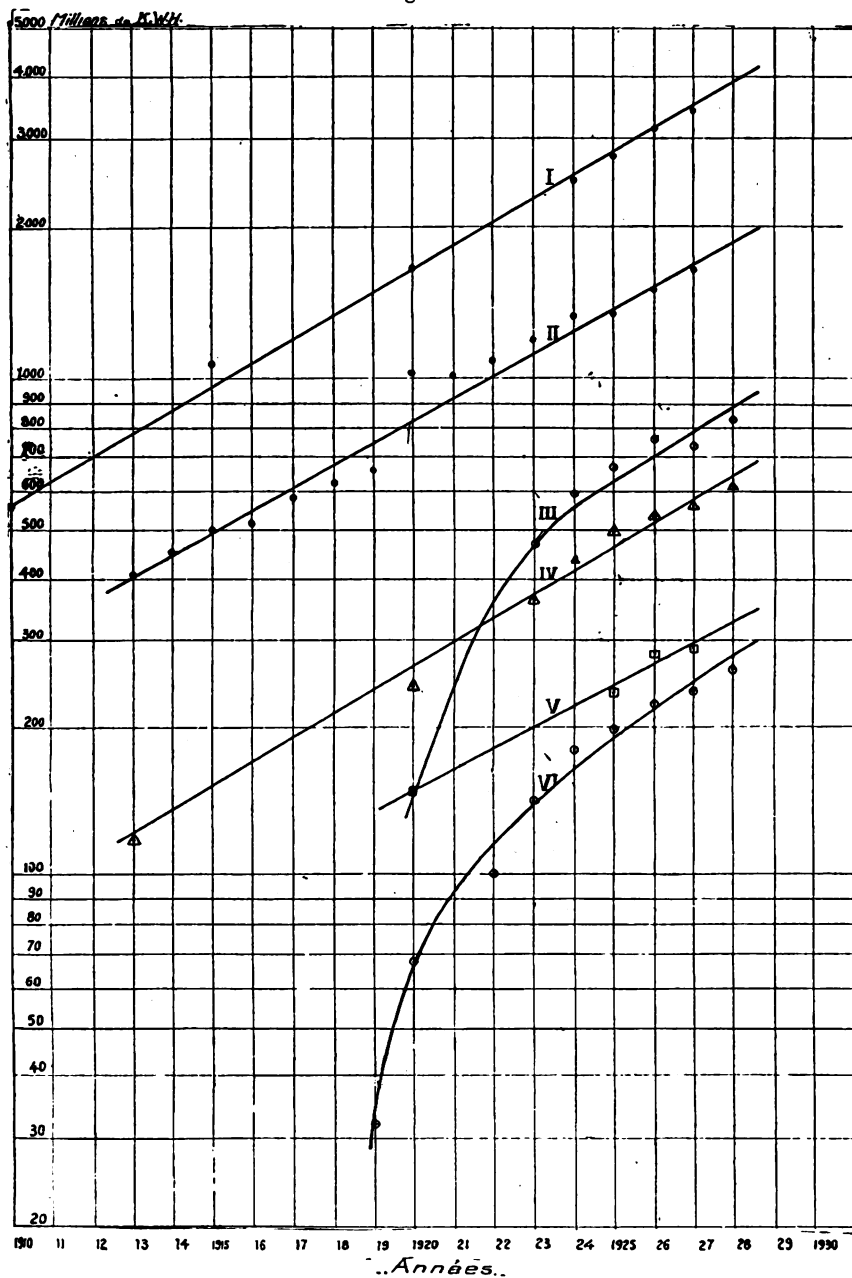
En ce qui concerne les usines hydrauliques, les Américains n'hésitent pas à aborder de vastes programmes d'aménagement intégral des rivières avec réservoirs régulateurs de grands volumes aussi bien que des programmes de construction de basses chutes extrêmement audacieux, mais qui sont légitimés par le grand développement de leurs réseaux, par la haute utilisation des usines et par la forte consommation spécifique de leur clientèle.

Je voudrais toutefois préciser que dans un voyage à travers la totalité des Etats-Unis, nous n'avons rencontré aucune installation qui ne soit comparable à celles réalisées en Europe, les plans sont plus vastes simplement du fait de la grande masse des agglomérations desservies.

On publie généralement, par exemple, dans la statistique technique que la consommation par habitant et le développement annuel des secteurs sont incomparablement plus grands aux Etats-Unis qu'en Europe. Il convient d'être très attentif lorsqu'on compare des chiffres et des statistiques, c'est ainsi que ayant relevé sur un graphique les consommations annuelles des secteurs ci-après :

CHICAGO, SAN-FRANCISCO, UNION D'ELECTRICITÉ, COMPAGNIE PARISIENNE DE DISTRIBUTION D'ELECTRICITÉ, SOCIÉTÉ D'ELECTRICITÉ DE PARIS, etc... en portant comme ordonnées le logarithme de l'énergie annuelle vendue nous avons obtenu le graphique ci-contre qui montre que l'allure du développement des secteurs français n'est pas tellement inférieure à celle des secteurs américains, ainsi qu'on le croit généralement. Les secteurs américains se sont développés dès 1889,

Figure 14.



- |                                                              |                                                   |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| I. Réseau de la Commonwealth (Chicago).                      | V. — la Société d'Electricité de Paris.           |
| II. — la Pacific (San Francisco).                            | VI. -- l'Energie électrique du Nord de la France. |
| III. — l'Union d'Electricité.                                |                                                   |
| IV. — la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité. |                                                   |

et du fait de la guerre, ainsi que de cette avance ils sont simplement à un stade plus ancien.

Sur un autre point, je désirerais prouver que nos réseaux français

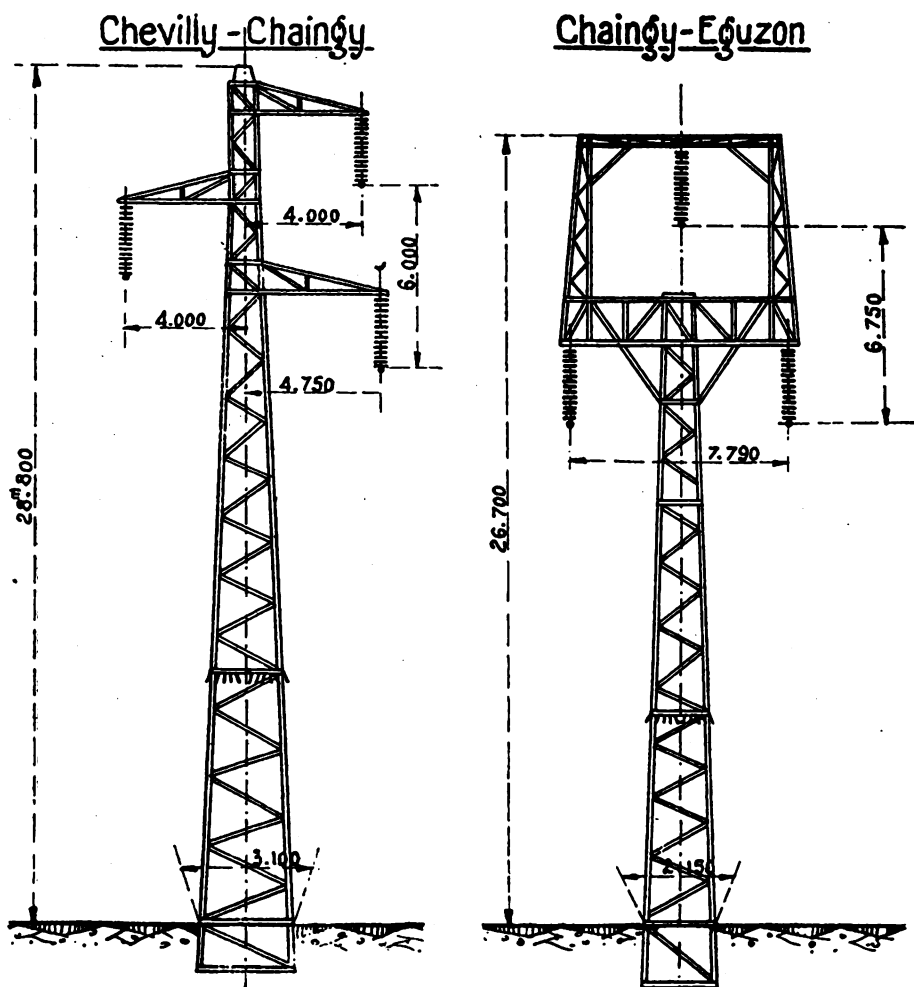


Fig. 15. — Pylones à 220 kV (type français).

ne sont pas aussi en retard qu'on le pense généralement, ce point est l'interconnexion des réseaux.

Il y a en Amérique de très grands réseaux de transport destinés à l'alimentation des gros centres de consommation, mais ces réseaux sont en général établis dans un Etat et du fait de la rivalité entre



Etats ne sont pas à proprement parler des réseaux de grande interconnexion entre régions différentes.

Dans la séance du 5 juin 1929, notre collègue, M. MATHIVET re-

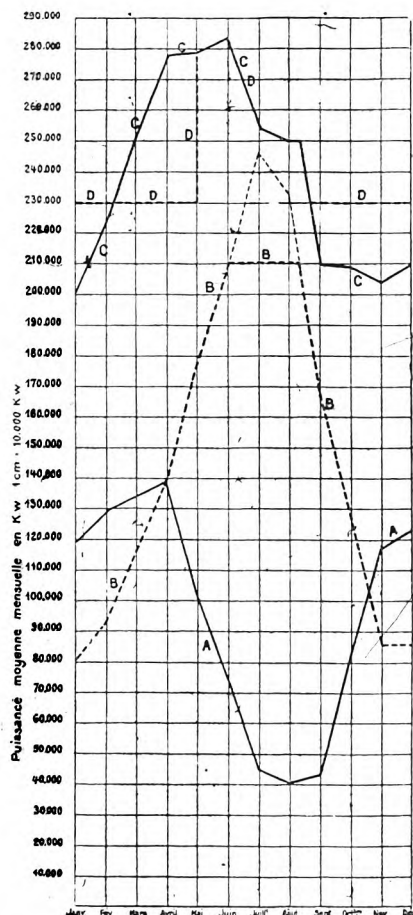


Fig. 16. — Compensation des régimes hydrauliques en France.

grettait notre retard sur ce point et proposait (Bulletin n° 97, tome IX, page 932) de couvrir la France d'un grand réseau à 220 000 volts réunissant tous les grands centres.

La carte que publie chaque année la Direction des Forces Hydrauliques au Ministère des Travaux publics permet de constater chaque

année le développement de notre réseau national. Il a été établi que les interconnexions entre régions voisines se feraient à 150 000 volts et cette tension est suffisante en notre pays où les distances ne sont pas celles de l'Amérique.

Cependant la tension de 220 000 volts devra être adoptée pour les grands transports entre nos régions de production hydraulique, Alpes (Génissiat), Massif Central (Cère, Marèges, Truyère), Rhin (Kembs, Ottmarsheim), mais nous savons que ce réseau général a déjà reçu un commencement de réalisation et que 450 kilomètres sont près d'être achevés.

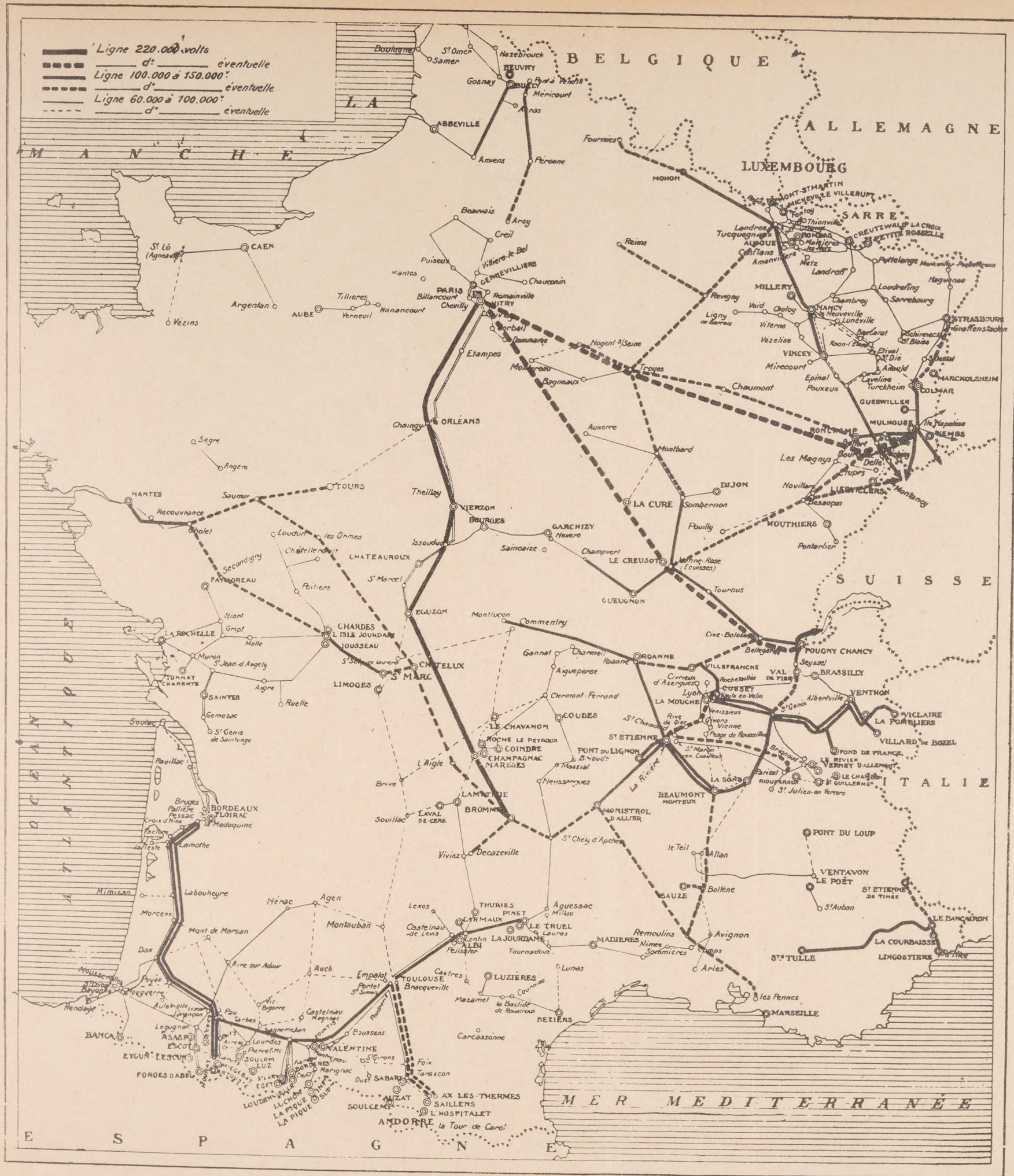
Nous concluons donc qu'avec des moyens plus réduits que ceux dont dispose la nation jeune et riche des Etats-Unis, l'industrie électrique se développe actuellement de façon très satisfaisante en France.

De nombreux voyages en divers pays étrangers m'ont permis, tout en appréciant et en admirant les belles installations réalisées aux Etats-Unis, en Italie, en Suisse et en d'autres pays, de reconnaître que nos progrès dans l'industrie électrique sont loin d'être hors de comparaison avec ceux de ces nations, et de regretter ainsi que le faisait récemment un de nos Ministres de l'Intérieur la tendance trop courante du Français à déprécier les résultats de son activité, particulièrement devant les étrangers.

Nous venons de constater que le réseau a 220 000 volts actuellement en cours de construction en France, a toutes chances de bien fonctionner si l'on s'en réfère au bon service des réseaux d'Amérique ; de plus, de très puissantes usines hydrauliques sont actuellement en cours d'aménagement en France, enfin, nous savons que notre réseau rural sera achevé en 1935, c'est-à-dire que toutes les communes françaises seront électrifiées et largement desservies à cette date, nous avons donc toutes raisons d'avoir confiance dans les résultats de l'effort accompli, malgré les difficultés résultant de la période que nous venons de traverser.

---









# FORMULE SIMPLE PERMETTANT, DANS TOUS LES CAS, LE CALCUL RAPIDE DES RÉSISTANCES OHMIQUES EN COURANT ALTERNATIF <sup>(1)</sup>

par M. Albert LEVASSEUR.

Ingénieur Conseil, Conférencier à l'Ecole Supérieure d'Electricité.

*Après avoir montré l'insuffisance des équations approchées proposées jusqu'à ce jour, l'auteur établit une nouvelle formule valable pour toute l'échelle des fréquences et permettant de calculer très rapidement et en toutes circonstances les résistances ohmiques en courant alternatif. Il signale que, grâce à son extrême simplicité, cette formule peut être très commodément introduite dans les calculs algébriques, ce qui rend aisée la résolution de certains problèmes pratiquement insolubles jusqu'à maintenant.*

## I. — Introduction

On sait que le rapport  $K$  de la résistance en courant alternatif à la résistance en courant continu, pour un conducteur cylindrique de diamètre  $2a$ , de conductivité  $c$  et de perméabilité  $\mu$ , peut être calculé exactement au moyen de la formule de lord Kelvin :

$$K = \frac{Q}{2} \times \frac{\text{ber } Q \text{ bei}' Q - \text{bei } Q \text{ ber}' Q}{(\text{bei}' Q)^2 + (\text{ber}' Q)^2} \quad (1)$$

avec  $Q = \pi a \sqrt{8\mu c f}$  ( $f$  = fréquence du courant),

$\text{ber } Q$  et  $\text{bei } Q$  étant respectivement la partie réelle et le coefficient de la partie imaginaire de la fonction de Bessel d'ordre zéro de la variable imaginaire :  $Q\sqrt{-j}$ .

Le calcul numérique de l'expression (1) s'effectue sans difficulté au moyen des tables des fonctions  $\text{ber } Q$ ,  $\text{bei } Q$ ,  $\text{ber}' Q$  et  $\text{bei}' Q$ . Mais ce calcul, pour facile qu'il soit, est relativement long. De plus, il n'est pas toujours aisé d'interpoler très correctement. Enfin, il est

---

(1) Cette formule a fait l'objet d'une communication à l'Académie des Sciences, présentée dans la séance du 7 octobre 1929.

pratiquement impossible de faire entrer une relation telle que (1) dans des calculs algébriques tant soit peu compliqués, ce qui est un sérieux obstacle à la résolution de certains problèmes.

Ces incommodités disparaissent lorsque les fréquences considérées sont assez hautes pour qu'on puisse admettre que le courant est localisé dans la « coque fictive » imaginée par M. Boucherot. Cette coque fictive a pour épaisseur :

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\mu c f}}.$$

et l'on a :

$$K = \frac{\pi a^2}{\pi a^2 - \pi (a - \varepsilon)^2}. \quad (2)$$

Si l'on prend, comme section du tube fictif, la valeur approchée  $2\pi a \varepsilon$ , il convient d'ajouter le terme  $\frac{1}{4}$  à l'expression trouvée pour K; celle-ci devient, par conséquent :

$$K = \frac{\pi a^2}{2\pi a \varepsilon} + \frac{1}{4},$$

ce qui donne, lorsqu'on remplace  $\varepsilon$  par sa valeur :

$$K = \pi a \sqrt{\mu c f} + \frac{1}{4}. \quad (3)$$

Nous devons signaler ici qu'il n'est nullement nécessaire de faire intervenir la considération de la coque fictive pour arriver à la formule (3). Celle-ci se déduit immédiatement des propriétés de la courbe :

$$K = F(Q)$$

propriétés établies par M. Brylinski, au moyen des résultats de lord Kelvin, dans un remarquable travail qui date de 1890 et dont nous allons avoir à reparler (2).

Les relations (2) et (3) ne sont malheureusement pas valables en toutes circonstances. Ainsi, lorsque  $f$  tend vers zéro, K calculé par la formule (3) (qui pourtant reste alors la moins mauvaise) tend vers  $\frac{1}{4}$  au lieu de tendre vers 1. D'ailleurs il arrive souvent que le diamètre et que la substance du conducteur soient tels que, même à des fré-

---

(2) BRYLINSKI. — *L'Electricien*, 1<sup>er</sup> mars 1890.

quences relativement élevées, les formules (2) ou (3) soient à rejeter et qu'on ne puisse pas non plus admettre l'approximation  $K = 1$ .

M. Brylinski tourna autrefois la difficulté en décomposant la courbe  $K = F(Q)$  en trois tronçons, et en affectant à chacun d'eux une équation particulière. Mais ce procédé laisse subsister la principale insuffisance des formules approchées proposées jusqu'à présent : *ces formules n'étant valables qu'entre certaines limites, il est impossible de les introduire dans les calculs dont on veut tirer des conclusions très générales*. De tels calculs doivent, par exemple, être entrepris lorsqu'on étudie certaines des propriétés du four à induction sans fer.

Un groupe de deux relations, respectivement valables dans des circonstances différentes, fut aussi proposé par lord Rayleigh :

$$K = 1 + \frac{1}{48} \left( \frac{\pi^2 d^2 f}{\rho} \right)^2 - \frac{1}{2880} \left( \frac{\pi^2 d^2 f}{\rho} \right)^4 + \frac{1}{58647} \left( \frac{\pi^2 d^2 f}{\rho} \right)^6,$$

applicable si :  $\frac{\pi^2 d^2 f}{\rho} < 1$ ,

et  $K = \sqrt{\frac{\omega \mu \pi d^2}{8 \rho}}$ ,

applicable si :  $\frac{\pi^2 d^2 f}{\rho} > 1$ .

Ce groupe donne de désastreuses approximations, et il est, au surplus, très peu maniable.

C'est, croyons-nous, M. Brylinski qui le premier se rendit compte de l'intérêt qu'eût présenté une formule approchée unique. Ses recherches le conduisirent à l'équation (3), (4) :

$$K = 0,36768 + 0,009266 Q + \frac{3,30566}{Q^4} + \sqrt{0,1153 Q^2 - 0,2593}. \quad (4)$$

Cette formule impliquait trois inconvénients d'inégale gravité (5) :

(3) BRYLINSKI, *loc. cit.*, p. 196.

(4) Nous avons remplacé les notations originales par les nôtres.

(5) Nous nous excusons de faire, en quelque sorte, la critique du beau travail de notre éminent collègue. C'est précisément parce que l'équation approchée (4) était restée, jusqu'à aujourd'hui, la meilleure, que la logique même nous oblige à la prendre comme terme de comparaison.

Les deux premières de nos observations avaient d'ailleurs été formulées par M. BRYLINSKI lui-même.

1° Son application donne lieu à des erreurs absolues pouvant atteindre 0,0381 et à des erreurs relatives pouvant atteindre 3,53 pour cent (soit  $\frac{1}{28}$ ).

Mais il convient de remarquer que dans la pratique, de tels écarts sont en général, sans grande importance.

2° Pour les valeurs de  $Q$  inférieures à 1,5, la quantité située sous le radical devient négative et, par suite,  $K$  est alors imaginaire. La formule (4) n'a donc pas toute la généralité qu'on était en droit de souhaiter <sup>(6)</sup>.

3° Enfin, l'équation (4) est trop peu maniable pour être couramment utilisée.

## II. — Recherche d'une nouvelle formule

Une loi quelconque peut toujours être représentée par une infinité de formules empiriques. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, la principale difficulté n'est pas d'arriver à une bonne approximation, mais d'obtenir une équation suffisamment *simple*. Par exemple, si l'on connaît les coordonnées de  $m$  points de la courbe proposée, rien n'est plus facile que de trouver une relation de la forme :

$$y = Ax^{m-1} + Bx^{m-2} + \dots + M$$

à laquelle corresponde une ligne passant par les  $m$  points. Mais l'équation sera pratiquement inutilisable si  $m$  est tant soit peu élevé <sup>(7)</sup>. Pour parvenir à un résultat simple, il convient de renoncer aux procédés purement analytiques, et de faire à l'intuition un appel aussi large que possible.

Imaginons une famille de courbes, telle que celles-ci aient grossièrement la forme de la ligne à formuler (mêmes points remarquables, mêmes asymptotes, etc.), et supposons connue et simple l'intégrale générale que représente cette famille. Donner aux paramètres arbitraires des valeurs déterminées, c'est choisir l'une des courbes. Faire varier ces paramètres, c'est, en quelque sorte, dépla-

(6) M. BRYLINSKI indique à cette occasion que lorsque  $Q$  est compris entre 0 et 1,5, on peut adopter pour  $K$  la valeur 1 en ne commettant qu'une erreur inférieure à  $\frac{1}{40}$ .

(7) Si, au contraire,  $m$  est petit, l'approximation sera évidemment mauvaise. Au surplus, une expression telle que celle-ci ne permet pas d'extrapoler (ni même, quelquefois, d'interpoler.) Il ne faut pas, en effet, perdre de vue qu'un polynôme de degré  $m-1$ , ayant une dérivée de degré  $m-2$ , peut présenter  $m-2$  maxima ou minima.



cer ou déformer la courbe initialement choisie. Dans bien des cas, on pourra ainsi réaliser une *déformation* de la courbe intégrale, telle que celle-ci vienne se superposer pratiquement à la ligne à formuler, dont on aura alors une équation approchée et simple.

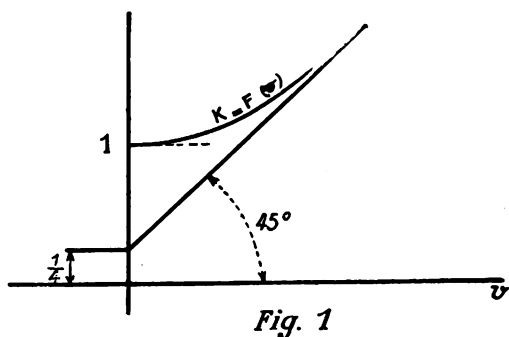
C'est ce procédé que nous avons utilisé et l'exposé ci-après va achever d'indiquer la marche suivie :

Simplifions d'abord le problème, en remplaçant la variable de lord Kelvin :

$$Q = \pi a \sqrt{8\mu cf}$$

par une nouvelle variable :

$$v = \pi a \sqrt{\mu cf}.$$



La courbe à formuler :  $K = F(v)$  a pour asymptote (fig. 1) la droite d'équation :

$$K = v + \frac{1}{4}.$$

En outre, cette courbe passe par le point de coordonnées  $v = 0$ ,  $K = 1$ , et sa tangente en ce point est parallèle à l'axe  $0v$ .

Cela posé, considérons une certaine fonction  $y$  de la variable  $x$  et du paramètre  $n$  (supérieur à 1) :

$$y = \sqrt[n]{\left(\frac{3}{4}\right)^n + x^n} + \frac{1}{4}.$$

A cette fonction correspondent des courbes qui jouissent des propriétés suivantes :

1° Elles ont pour asymptote la droite d'équation :

$$y = x + \frac{1}{4}.$$

2° Elles passent par le point de coordonnées :  $x = 0, y = 1$ ,

3° Leur tangente, en ce point, est parallèle à l'axe  $Ox$ .

Ces courbes ont donc plus ou moins grossièrement la disposition générale de celle de la figure I et, par suite, il n'est pas absurde d'espérer qu'en effectuant un « réglage » convenable du paramètre  $n$  nous obtiendrons une courbe qui coïncidera sensiblement avec  $K = F(v)$ . On va voir, par les résultats donnés ci-après à quel point cet espoir est justifié.

Auparavant, nous ferons remarquer qu'il convient de ne donner à  $n$  que des valeurs entières. Sans doute améliorerait-on quelque peu l'approximation en faisant prendre à  $n$  une valeur fractionnaire. Mais ce minuscule avantage serait bien plus que compensé par le fâcheux allongement des calculs numériques, lors de l'utilisation de la formule trouvée.

La meilleure coïncidence nous a été donnée par la valeur  $n = 6$ . c'est-à-dire par la formule :

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + v^6} + \frac{1}{4}. \quad (5)$$

Les résultats obtenus sont indiqués au tableau page suivante.

On voit que l'erreur absolue atteint au maximum 0,0235, et que l'erreur relative atteint au plus 1,15 pour cent, soit  $\frac{1}{87}$ .

De tels écarts sont tout à fait négligeables en pratique. D'autre part, la formule (5) ne donne lieu qu'à des calculs numériques très brefs <sup>(8)</sup>, et elle est très maniable dans les calculs algébriques. Le problème peut donc être considéré comme entièrement résolu.

(8) On pourrait, au besoin, les rendre encore un peu plus rapides en remplaçant la relation (5) par la formule :

$$K = \sqrt[10]{\left(\frac{3}{4}\right)^{10} + v^{10}} + \frac{1}{4}. \quad (6)$$

Les erreurs maxima seraient plus grandes mais elles ne deviendraient pourtant pas énormes, et elles resteraient tolérables dans certains cas.

C'est que l'approximation obtenue ne varie que lentement lorsqu'on modifie le paramètre  $n$ .

| Q   | $v = \pi a \sqrt{\mu c f}$ | K exact<br>(d'après<br>Kelvin). | K calculé<br>par<br>la formule (5). | Erreur<br>absolue. | Erreur relative (1). |
|-----|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 0   | 0                          | 1,0000                          | 1,0000                              | 0,0000             | 0,0 pour cent        |
| 0,5 | 0,17678                    | 1,0000                          | 1,0000                              | 0,0000             | 0,0 —                |
| 1   | 0,35356                    | 1,0036                          | 1,0014                              | — 0,0042           | — 0,4 —              |
| 1,5 | 0,53034                    | 1,0258                          | 1,0149                              | — 0,0109           | — 1,1 —              |
| 2   | 0,70712                    | 1,0790 (2)                      | 1,0695                              | — 0,0095           | — 0,9 —              |
| 2,5 | 0,88390                    | 1,1747                          | 1,1819                              | + 0,0072           | + 0,6 —              |
| 3   | 1,06068                    | 1,3180                          | 1,3317                              | + 0,0137           | + 1,0 —              |
| 3,5 | 1,2375                     | 1,4920                          | 1,4975                              | + 0,0055           | + 0,4 —              |
| 4   | 1,4142                     | 1,6778                          | 1,6694                              | — 0,0084           | — 0,5 —              |
| 4,5 | 1,5910                     | 1,8628                          | 1,8439                              | — 0,0189           | — 1,0 —              |
| 5   | 1,7678                     | 2,0430                          | 2,0195                              | — 0,0235           | — 1,15 —             |
| 5,5 | 1,9446                     | 2,2190                          | 2,1937                              | — 0,0253           | — 1,0 —              |
| 6   | 2,1214                     | 2,3937                          | 2,3720                              | — 0,0217           | — 0,9 —              |
| 8   | 2,8285                     | 3,0956                          | 3,0787                              | — 0,0169           | — 0,5 —              |
| 10  | 3,5356                     | 3,7980                          | 3,7857                              | — 0,0123           | — 0,3 —              |
| 15  | 5,3034                     | 5,5620                          | 5,5534 (3)                          | — 0,0086           | — 0,1 —              |
| 20  | 7,0712                     | 7,3277                          | 7,3212 (3)                          | — 0,0065           | — 0,1 —              |
| 30  | 10,6068                    | 10,8765                         | 10,8568 (3)                         | — 0,0197           | — 0,2 —              |

1. La plus forte des erreurs relatives (onzième ligne) a été indiquée avec deux décimales.

2. M. Janet, qui a bien voulu nous faire l'honneur de présenter notre formule à l'Académie des Sciences, nous a signalé qu'il existe, en ce point des tables de lord Kelvin, une légère erreur. La valeur exacte de K, correspondante à  $Q = 2$ , est non pas 1,0805 comme le dit Kelvin, mais 1,0790. Il s'ensuit de là, que la coïncidence donnée par la formule (5) est encore meilleure que nous ne l'avions pensé puisque l'erreur relative est seulement — 0,9 pour cent, au lieu d'être — 1,0 pour cent comme nous l'avions cru initialement en adoptant la valeur 1,0805.

3. Ces trois derniers nombres coïncident au dix-millième près avec ceux qu'on obtiendrait en appliquant la formule (3) et il en serait nécessairement de même pour tous les suivants.

*Remarque.* — On sait que tous les auteurs ne donnent pas exactement le même nombre pour l'ordonnée à l'origine de l'asymptote. Les valeurs à 0,2614 (M. Brylinski) et 0,2652 (Mascart) avaient été autrefois proposées. Nous avons, en conséquence, effectué quelques sondages avec les formules (9) :

$$K = \sqrt[6]{(1 - 0,2652)^6 + v^6} + 0,2652 \quad (7)$$

$$K = \sqrt[6]{(1 - 0,2614)^6 + v^6} + 0,2614 \quad (8)$$

(9) Il est évident que les relations essayées doivent être de la forme :

$$K = \sqrt[6]{(1 - \lambda)^6 + v^6} + \lambda.$$

et avec la formule intermédiaire :

$$K = \sqrt[6]{(1 - 0,255)^6 + v^6} + 0,255. \quad (9)$$

En voici les résultats :

| Formule employée. | Valeur de Q. | Erreur relative. |
|-------------------|--------------|------------------|
| (7)               | 3            | + 2,0 pour cent  |
| (8)               | 3            | + 1,8 —          |
| (9)               | 3            | + 1,3 —          |

Ces équations (7), (8) et (9) sont donc à rejeter, et la comparaison des résultats montre, en outre, que l'amélioration d'approximation qu'on obtiendrait peut-être, en modifiant très légèrement les termes  $\frac{1}{4}$  et  $\frac{3}{4}$  de la formule (5), serait dénuée de tout intérêt pratique et ne justifierait aucunement l'abandon de ces nombres « ronds ».

### III. — Formule générale applicable aux conducteurs dont la section a une forme quelconque

Nous désignerons par  $S$  l'aire de cette section, et par  $p$  son périmètre.

On avait, dans le cas d'un conducteur cylindrique :

$$v = \pi a \sqrt{\mu c f} = \frac{\pi a^2}{2\pi a \varepsilon} = \frac{S}{p \varepsilon}.$$

Ce qu'il y aura de mieux à faire, lorsque la section du conducteur aura une forme quelconque, sera d'admettre que la formule (5) reste valable avec  $v$  prise égale à  $\frac{S}{p \varepsilon}$ .

On écrira donc <sup>(10)</sup> :

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + v^6} + \frac{1}{4} = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{p \varepsilon}\right)^6} + \frac{1}{4},$$

(10) D'après ce qui a été dit plus haut, on pourra, si l'on est peu soucieux de l'approximation, abréger très légèrement le calcul numérique en employant la formule :

$$K = \sqrt[10]{\left(\frac{3}{4}\right)^{10} + \left(\frac{S}{p \varepsilon}\right)^{10}} + \frac{1}{4}. \quad (10)$$

relation qui devient, si l'on remplace  $\epsilon$  par sa valeur :

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{2\pi S \sqrt{\mu cf}}{p}\right)^6} + \frac{1}{4}. \quad (11)$$

#### IV. — Résumé

La formule (5) :

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + v^6} + \frac{1}{4}$$

ou :

$$K = \sqrt[6]{0,17798 + (\pi a \sqrt{\mu cf})^6} + 0,25$$

permet de calculer très rapidement, *quelles que puissent être les circonstances de diamètre, de substance ou de fréquence*, le rapport de la résistance d'un conducteur cylindrique, en courant alternatif, à sa résistance en courant continu, *avec une erreur relative qui, dans les cas les plus défavorables ne dépasse pas sensiblement un centième, et qui, le plus souvent, reste bien inférieure à ce nombre.*

La formule (11) :

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{p\epsilon}\right)^6} + \frac{1}{4}$$

ou :

$$K = \sqrt[6]{0,17798 + \left(\frac{2\pi S \sqrt{\mu cf}}{p}\right)^6} + 0,25$$

permet d'effectuer le même calcul <sup>(11)</sup>, dans des conditions analogues <sup>(12)</sup>, pour un conducteur dont la section a une forme quelconque.

L'introduction de ces formules dans les calculs algébriques rend facile la résolution de certains problèmes, tels que ceux qui ont pour objet l'étude de la variation d'une grandeur en fonction de la fréquence d'un courant.

Nous espérons avoir mis entre les mains des électriciens un instrument capable de leur rendre d'appréciables services.

(11) Il est à peine besoin de dire qu'il convient, lors de l'application numérique de nos formules (5), (11), (6) ou (10), de faire usage du système d'unités C. G. S. électromagnétiques.

Il en est d'ailleurs de même, pour toutes les équations qui figurent dans la présente communication.

(12) On aura soin de ne pas oublier que, bien qu'il soit contenu dans la formule (11), celle-ci reste pleinement valable même lorsque l'approximation de la « coque fictive » ne l'est plus, aux basses fréquences par exemple.

# SUR L'EMPLOI DES RELAIS D'IMPÉDANCE POUR LA PROTECTION DES LIGNES AÉRIENNES CONTRE LES MISES A LA TERRE

Par M. J. FALLOU

---

*Introduction. — Expression du rapport  $U/I$  en fonction des coefficients d'inductance de la ligne. — Calcul de  $U/I$  dans le cas d'un court-circuit entre une phase et la terre. — Calcul de  $U/I$  dans le cas d'un court-circuit entre deux phases et la terre. — Exemples numériques. — Fonctionnement des relais. — Conclusions.*

## I. — Introduction

La protection sélective des lignes de distribution, dans le cas d'un réseau à une seule file de lignes alimentée en plusieurs points, est un problème dont la solution parfaite n'est pas encore trouvée.

Le dispositif le plus satisfaisant, développé depuis plusieurs années par certains constructeurs, est le relais d'impédance, ou, sous une forme d'apparence plus perfectionnée, le relais de réactance.

On sait qu'un tel relais a pour mission de provoquer le déclenchement d'une ligne avec un retard proportionnel à la distance comptée depuis ce relais jusqu'au défaut.

On a donc cherché à développer des relais dont la temporisation ne dépende que de l'impédance ou de la réactance de la ligne, et, pour ce faire, on applique aux enroulements de ces relais des courants proportionnels, d'une part au courant  $I$  dans la phase perturbée, et d'autre part à la tension  $U$  de cette phase. En combinant ingénieusement les enroulements et les parties mobiles des relais, on obtient une temporisation qui est fonction du rapport  $\frac{U}{I}$  (1).

---

(1) ou du rapport  $\frac{U}{I} \sin \varphi$  (relais de réactance)  $\varphi$  étant de décalage de  $I$  sur  $U$ .

On prétend avoir réalisé de ce fait un relais dont la temporisation est indépendante de l'intensité, et un appareil qui mesure l'impédance de la ligne, donc la longueur comprise entre le relais et le défaut. Cette affirmation se trouve répétée dans tous les articles sur les relais d'impédance, et on semble la considérer comme un fait évident *a priori*.

On peut néanmoins montrer bien facilement que le rapport  $\frac{U}{I}$  de la tension au courant d'une phase ne mesure l'impédance de la ligne, et par suite la distance du relais au défaut, que dans certains cas pratiquement exceptionnels, c'est-à-dire pour les courts-circuits entre trois phases ou entre deux phases sans mise à la terre. Mais dans le cas le plus fréquent en pratique — au moins pour les lignes aériennes — où le court-circuit a lieu entre une ou deux phases et la terre, ce rapport  $\frac{U}{I}$  dépend largement de l'impédance des appareils branchés de part et d'autre de la ligne protégée, et par conséquent, indirectement, du courant débité.

Le problème peut être traité très complètement en faisant usage des coordonnées symétriques, et nous y aurons recours pour obtenir des relations permettant de calculer des exemples numériques; mais on peut dès l'abord en indiquer une solution « qualitative » en considérant seulement les coefficients de self inductance et d'inductance mutuelle de la ligne.

## II. — Expression du rapport $U/I$ en fonction des coefficients d'inductance de la ligne

Soient 1, 2, 3, les trois phases d'une ligne qui présente au point O un défaut à la terre (fig. 1).

Soient  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  les courants dans chaque phase, et  $I_r$  le courant de retour dans le sol.

Considérons le tronçon MO de la ligne, et appelons :  $L_1$  le coefficient de self inductance de chaque phase (supposée isolée dans l'espace).  $M_{11}$  le coefficient de mutuelle inductance de chaque phase avec la phase voisine (la ligne étant symétrique).  $L_r$  le coefficient de self inductance du circuit de retour par la terre.  $M_{11}$  le

coefficient de mutuelle inductance entre le circuit de retour par le sol et chacune des phases.  $\omega$  la pulsation du courant.

La chute de tension  $U_1$  entre les points M et O peut s'écrire :

$$U_1 = j\omega [L_l I_1 + M_{ll}(I_2 + I_3) + M_{ll}I_l - L_l I_l - M_{ll}(I_1 + I_2 + I_3)]$$

avec  $I_1 + I_2 + I_3 + I_l = 0$  et  $j = \sqrt{-1}$

d'où  $U_1 = j\omega I_1 (L_l + L_l - 2M_{ll}) + j\omega (I_2 + I_3) (M_{ll} + L_l - 2M_{ll})$  (1)

qui peut s'écrire aussi

$$U_1 = j\omega I_1 (L_l - M_{ll}) - j\omega I_l (M_{ll} + L_l - 2M_{ll}). \quad (2)$$

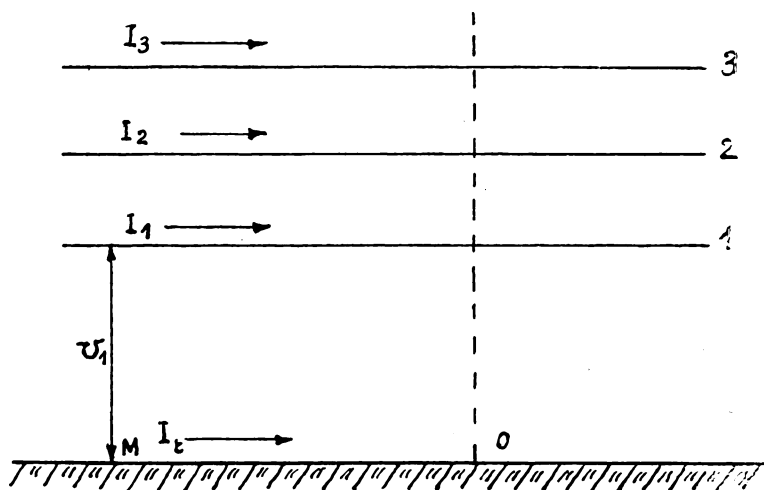


Figure 1

La tension  $U_1$  comprend donc non seulement la chute de potentiel due au courant  $I_1$  à travers la réactance effective  $\omega (L_l - 2M_{ll} + L_l)$  de la phase 1, mais aussi un terme dû à la mutuelle inductance effective des phases 2 et 3 parcourues respectivement par les courants  $I_2$  et  $I_3$ .

Pour que le rapport  $\frac{U_1}{I_1}$  ne dépende que des paramètres de la ligne, il faut :

1° ou bien que  $I_l$  soit nul, ce qui n'arrive que dans le cas exceptionnel où les trois phases se mettent à la terre au même point :

2° ou bien que  $I_2$  et  $I_3$  soient nuls, c'est-à-dire, que le défaut à la terre n'affecte qu'une seule phase, et que la ligne soit déconnectée à l'une de ses extrémités pour que les deux autres phases ne débitent pas.



Mais dans le cas général de mise à la terre sur une ligne connectée à ses deux extrémités, ou bien dans celui de mise à la terre double sur une ligne quelconque, le rapport  $\frac{U_1}{I_1}$  ne mesure pas à lui seul la longueur comprise entre le relais et le défaut.

### III. — Calcul de $U/I$ dans le cas d'un court-circuit entre une phase et la terre

Considérons (fig. 2) une ligne de transmission triphasée interconnectant deux centrales A et B, et supposons qu'en un point O de la ligne une des phases soit en court-circuit avec la terre.

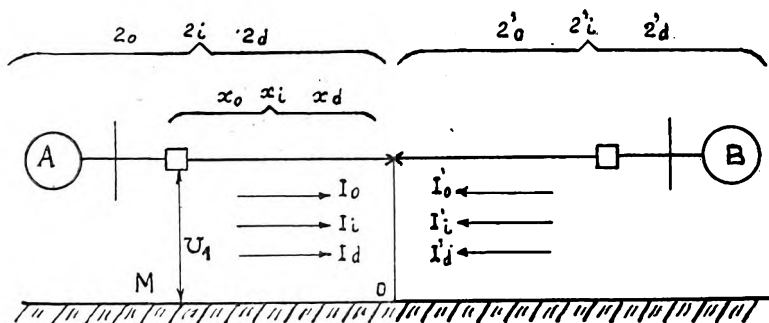


Figure 2

On sait que les courants et les tensions déséquilibrées dans les phases 1, 2, 3, peuvent être remplacés par trois systèmes équilibrés : un système triphasé équilibré à succession de phases directe, un système triphasé équilibré à succession de phases inverse, et un système de trois vecteurs égaux et de même phase dit système monophasé. Les organes du réseau étant supposés équilibrés, on peut appliquer la loi d'Ohm et de Kirchhoff à chacun des systèmes à condition de prendre pour impédance effective, dans chacun de ces systèmes, des impédances de valeurs spéciales qui tiennent compte des mutuelles inductances entre phases et entre phases et terre. Nous renvoyons pour plus de détails aux nombreuses études publiées sur ce sujet.

Cherchons à calculer en un point M le rapport  $\frac{U_1}{I_1}$  entre la tension de la phase 1 par le rapport à la terre et le courant  $I_1$  qui traverse

cette phase, c'est ce rapport que mesure le relais d'impédance situé en M.

Nous appellerons :  $Z_d$   $Z_i$   $Z_0$  les impédances des systèmes direct inverse et monophasé, mesurées du point O vers le système A.  $Z'_d$   $Z'_i$   $Z'_0$  les grandeurs analogues mesurées vers le système B.  $X_d$   $X_i$   $X_0$  les impédances de la ligne seule entre les points O et M.

On sait<sup>(1)</sup> que le courant de court-circuit total  $J_1$  dans la phase 1 au point O est égal à la somme des composantes  $J_d$   $J_i$   $J_0$ .

Ces composantes étant égales entre elles et au rapport

$$\frac{E}{\zeta_d + \zeta_i + \zeta_0}$$

E étant la tension simple normale du réseau, et en posant

$$\frac{1}{\zeta_d} = \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z'_d} \quad \frac{1}{\zeta_i} = \frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z'_i} \quad \frac{1}{\zeta_0} = \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z'_0}$$

Le courant qui traverse la phase 1 au point M a pour composantes

$$I_d = \frac{\zeta_d}{Z_d} J_d \quad I_i = \frac{\zeta_i}{Z_i} J_i \quad I_0 = \frac{\zeta_0}{Z_0} J_0$$

et a donc pour valeur

$$I_1 = I_d + I_i + I_0 = \frac{E}{\zeta_d + \zeta_i + \zeta_0} \left( \frac{\zeta_d}{Z_d} + \frac{\zeta_i}{Z_i} + \frac{\zeta_0}{Z_0} \right)$$

La différence de potentiel  $U_1$  au point M a pour composantes

$$X_d I_d \quad X_i I_i \quad X_0 I_0$$

sa valeur est donc

$$U_1 = \frac{E}{\zeta_d + \zeta_i + \zeta_0} \left( X_d \frac{\zeta_d}{Z_d} + X_i \frac{\zeta_i}{Z_i} + X_0 \frac{\zeta_0}{Z_0} \right)$$

de sorte que

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{X_d \frac{\zeta_d}{Z_d} + X_i \frac{\zeta_i}{Z_i} + X_0 \frac{\zeta_0}{Z_0}}{\frac{\zeta_d}{Z_d} + \frac{\zeta_i}{Z_i} + \frac{\zeta_0}{Z_0}}$$

(1) « Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés » J. FALLOU, Bulletin S. F. E. 1926 n° 61, page 969.

Pour une ligne de transport les impédances  $X_d$  et  $X_i$  sont égales entre elles, donc

$$\frac{U_1}{I_1} = X_d + \frac{X_0 - X_d}{1 + \frac{\frac{\zeta_i}{Z_i} + \frac{\zeta_d}{Z_d}}{\frac{\zeta_0}{Z_0}}} \quad (3)$$

Le coefficient de  $(X_0 - X_d)$  peut varier depuis 0 (lorsque  $Z_0$  tend vers 0) jusqu'à 1 (lorsque  $Z_i$  et  $Z_d$  tendent vers 0), de sorte que  $\frac{U_1}{I_1}$  peut varier depuis  $X_d$  jusqu'à  $X_0$ .

Le rapport  $\frac{X_0}{X_d}$  varie avec le rapport de la distance  $\frac{d}{r}$  de l'écartement des fils à leur rayon, et avec la conductibilité du sol. D'après des mesures effectuées au Japon <sup>(1)</sup> le rapport  $\frac{X_0}{X_d}$  peut dépasser 6 pour  $\frac{d}{r} = 100$ , et atteint encore 4 pour  $\frac{d}{r} = 500$ .

$\frac{U_1}{I_1}$  peut donc théoriquement varier de 1 à 6 pour une même ligne suivant ses conditions d'exploitation.

*Remarque.* — En identifiant la relation 3 avec chacune des expressions 1 et 2 on trouve facilement :

$$\begin{aligned} L_l - M_{ll} &= X_d \\ (M_{ll} + L_l - 2M_{ll}) &= \frac{X_0 - X_d}{3} \\ (L_l + L_l - 2M_{ll}) &= \frac{2X_d + X_0}{3} \end{aligned}$$

d'où 
$$X_0 = (L_l + 2M_{ll}) + 3(L_l - 2M_{ll}).$$

#### IV. — Calcul de $U/I$ dans le cas d'un court-circuit entre deux phases et la terre

Reprenons la figure 2, et supposons que deux phases — les phases 1 et 2 par exemple — soient en court-circuit par la terre au même point O.

(1) S. BEKKU. *General Electric Review*. Juillet 1929.

Les composantes du courant *total* à l'endroit du défaut ont alors pour valeurs

$$J_d = \frac{E}{\Delta} (\zeta_0 + \zeta_i) \quad J_i = -a \frac{E}{\Delta} \zeta_0 \quad J_0 = -a^2 \frac{E}{\Delta} \zeta_i$$

avec

$$\Delta = \zeta_0 \zeta_i + \zeta_i \zeta_d + \zeta_0 \zeta_d$$

et

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (j = \sqrt{-1}).$$

On a, comme ci-dessus

$$U_1 = X_d I_d + X_i I_i + X_0 I_0$$

$$I_1 = I_d + I_i + I_0$$

et

$$I_d = \frac{\zeta_d}{Z_d} J_d \quad I_i = \frac{\zeta_i}{Z_i} J_i \quad I_0 = \frac{\zeta_0}{Z_0} J_0.$$

En tenant compte enfin de ce que  $X_i = X_d$  on trouve

$$\frac{U_1}{I_1} = X_d + a^2 (X_d - X_0) \frac{\frac{\zeta_0 \zeta_i}{Z_0}}{\frac{\zeta_d}{Z_d} (\zeta_0 + \zeta_i) - a \zeta_0 \zeta_i \left( \frac{1}{\zeta_i} + \frac{a}{\zeta_0} \right)}. \quad (4)$$

Si l'on ne considère que le courant de court-circuit instantané, on peut faire  $Z_i = Z_d$  et  $Z_i = Z_d$ . L'équation (4) devient alors

$$\frac{U_1}{I_1} = X_d + \frac{X_0 - X_d}{1 + \frac{\zeta_i}{2\zeta_0} \frac{Z_0}{Z_i} - j\sqrt{3} \frac{Z_0}{Z_i} \left( 1 + \frac{\zeta_i}{2\zeta_0} \right)}. \quad (5)$$

Si les impédances se réduisent à des réactances, et si l'on ne mesure que la composante réactive de  $\frac{U}{I}$  (reliés de réactance) l'équation (5) devient

$$\frac{U_1}{I_1} \sin \varphi = X_d + (X_0 - X_d) \frac{1 + \frac{Z_0}{Z_i} \frac{\zeta_i}{2\zeta_0}}{\sqrt{1 + \frac{Z_0}{Z_i} \frac{\zeta_i}{\zeta_0} + \frac{Z_0^2}{Z_i^2} \left( 3 + 3 \frac{\zeta_i}{\zeta_0} + \frac{\zeta_i^2}{\zeta_0^2} \right)}}. \quad (6)$$

Enfin, dans le cas le plus simple d'une ligne ouverte à l'une des extrémités B

$$\frac{U_1}{I_1} \sin \varphi = X_a + \frac{X_0 - X_d}{2 \sqrt{1 + \frac{Z_0}{Z_i} + \frac{Z_0^2}{Z_i^2}}} \quad (7)$$

qui peut varier depuis  $X_d$  si  $\frac{Z_0}{Z_i}$  tend sur l'infini, jusqu'à

$$X_d + \frac{\sqrt{3}}{2} (X_0 - X_d)$$

si  $\frac{Z_0}{Z_i}$  tend sur 0, c'est-à-dire dans des limites variant de 1 à 5,3 pour  $X_0 = 6X_d$ .

#### V. — Exemples numériques

Soit une ligne à 150 000 volts de 250 kilomètres de longueur servant à interconnecter deux centres A et B.

La puissance de chacun des centres A et B est égale à 600 000 kVA, et leur réactance inverse est de 20 pour cent; les transformateurs d'interconnexion sont des appareils de 100 000 kVA chacun, ayant une réactance de 12 pour cent.

Supposons qu'un défaut se produise entre une phase et la terre à l'extrémité de la ligne, près de la centrale B, et cherchons quelle est, d'après la relation 3 la valeur du rapport  $\frac{U_1}{I_1}$  mesuré par le relais d'impédance placé à l'origine A de la ligne.

Nous négligerons les résistances, et ne considérerons que le courant de court-circuit instantané pour lequel les réactances directes et inverses sont égales.

La réactance directe de la ligne seule est  $X_d = 100$  ohms et sa réactance monophasée est  $X_0 = 400$  ohms.

Les réactances comptées depuis les défauts vers la centrale A ont donc pour valeurs :

$$Z_d = Z_i = 134 \text{ ohms}$$

$$Z_0 = 427 \text{ ohms.}$$

Les réactances comptées depuis le défaut vers la centrale B ont pour valeurs

$$Z'_d = Z'_i = 34 \text{ ohms}$$

$$Z'_0 = 27 \text{ ohms.}$$

*Cas a* (fig. 3) : la ligne est fermée aux deux extrémités, et les points neutres des transformateurs sont reliés au sol en A et en B

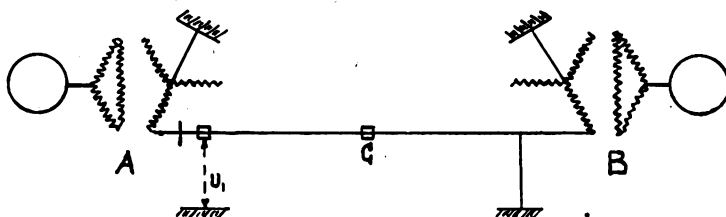


Figure 3

$$\frac{\zeta_0}{Z_0} = \frac{27}{454} \quad \frac{\zeta_i}{Z_i} = \frac{34}{168}$$

$$\frac{U_i}{I_i} = 100 + \frac{300}{1 + 6,8} = 138 \text{ ohms.}$$

*Cas b* (fig. 4) : la ligne est ouverte du côté B, avant le transformateur

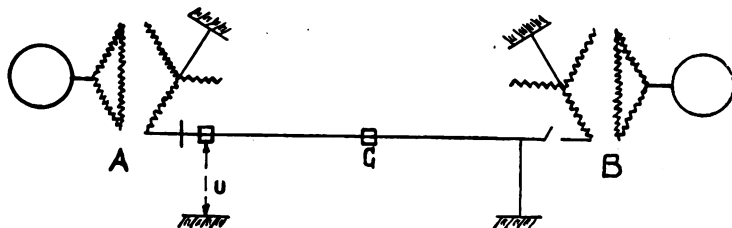


Figure 4

$$\frac{\zeta_d}{Z_d} = \frac{\zeta_i}{Z_i} = \frac{\zeta_0}{Z_0} = 1$$

$$\frac{U_i}{I_i} = 100 + \frac{300}{3} = 200 \text{ ohms.}$$

*Cas c* (fig. 5) : la ligne est fermée à ses deux extrémités, mais le point neutre du transformateur B est isolé.

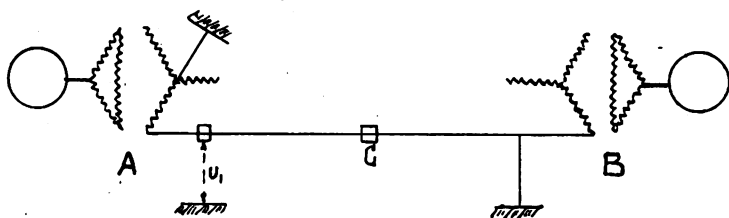


Figure 5

$$Z'_0 = \infty \quad \frac{\zeta_0}{Z_0} = 1 \quad \frac{\zeta_d}{Z_d} = \frac{\zeta_i}{Z_i} = \frac{34}{168}$$

$$\frac{U_1}{I_1} = 100 + \frac{300}{1,4} = 314 \text{ ohms.}$$

*Cas d* (fig. 6) : la ligne est fermée à ses deux extrémités sur les transformateurs A et B dont les points neutres sont reliés au sol, mais la centrale B est déconnectée de son transformateur.

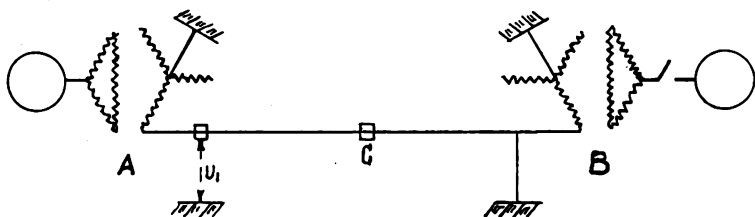


Figure 6

$$\frac{\zeta_d}{Z_d} = \frac{\zeta_i}{Z_i} = 1 \quad \frac{\zeta_0}{Z_0} = \frac{27}{454}$$

$$\frac{U_1}{I_1} = 100 + \frac{300}{34,6} = 108 \text{ ohms.}$$

## VI. — Fonctionnement des relais

Supposons que la ligne de l'exemple précédent soit divisée en deux tronçons égaux, de 125 kilomètres chacun, protégés par des relais d'impédance A et C. Les caractéristiques de ces relais sont supposées rectilignes (fig. 7),

Pour qu'il y ait sélection, il faut que l'interrupteur placé en C fonctionne seul pour tout défaut entre C et B; il faut donc que pour tout défaut au delà de C la différence entre les temporisations des relais A et C soit au moins égale au temps  $t_0$  nécessaire à l'ouverture complète du disjoncteur placé en C. On évalue généralement ce temps à 0,7 seconde.

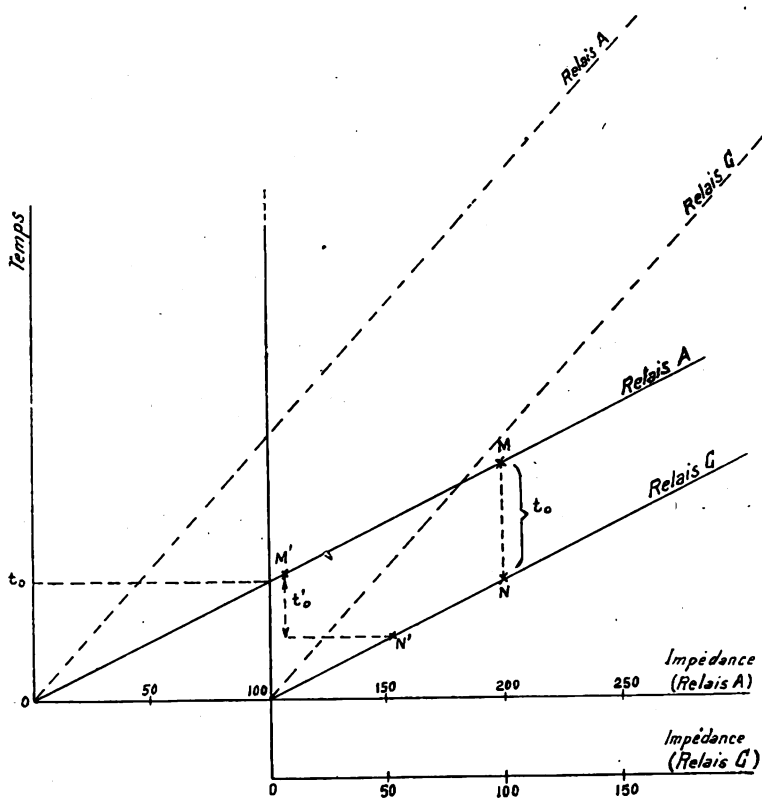


Figure 7

Supposons que les relais aient été réglés en prenant pour impédance de chacun des tronçons AC et CB leur impédance apparente à vide  $\frac{1}{2} \left( X_d + \frac{X_0 - X_d}{3} \right)$  soit 100 ohms.

Dans le cas *b* (fig. 4) le relais A mesurera 200 ohms, et le relais C mesurera 100 ohms; les temporisations des relais A et C seront données respectivement par les points M et N de la fig. 7, la différence des temps sera donc  $t_0$  et il y aura sélection.



Mais si le réseau est constitué comme dans le cas *d* (fig. 6), le relais A mesurera 108 ohms, et le relais C 54 ohms; les temporisations des relais A et C seront données par les points M' et N' des caractéristiques (fig. 7) de sorte que la différence de temps sera seulement  $t'_0 = 0,54 t_0$  : le disjoncteur A partira donc avant que le disjoncteur C ait fini d'ouvrir le court-circuit et le tronçon AC sera coupé intempestivement.

Pour avoir sélection dans tous les cas possibles, il sera donc nécessaire de changer les caractéristiques des relais selon les tracés pointillés, de manière à conserver une différence de temporisation  $t_0$  lorsque la réactance apparente mesurée se réduit à la réactance synchrone  $X_d$ , égale à 50 ohms par tronçon dans le cas particulier.

Mais une fois ces caractéristiques ainsi modifiées, les temps de déclenchement seront considérablement augmentés dans certains cas : dans le cas *c* par exemple (fig. 5) où le relais C mesure  $\frac{314}{2} = 157$  ohms, le temps que mettra ce relais pour fermer ses contacts sera  $3,1 t_0$ , soit environ 2,2 seconde pour  $t_0 = 0,7$ .

### Conclusions

Les relais d'impédance échelonnés le long d'une ligne, et chargés de protéger cette ligne contre les mises à la terre, fonctionnent donc avec une temporisation dont la valeur absolue dépend non seulement de la distance qui les sépare du défaut, mais aussi du courant qui circule dans les différentes phases, c'est-à-dire, en fin de compte, des conditions d'utilisation de la ligne qui peuvent varier d'un instant à l'autre.

On peut déjà conclure de ceci qu'il est parfaitement illusoire de demander à ces relais — comme l'ont prétendu plusieurs constructeurs — de fournir une indication même approximative sur la position du défaut; cette observation fait disparaître les avantages que certains ont cru pouvoir attribuer aux relais à caractéristiques rectilignes, comparés aux appareils à temps étagés.

Mais la variation de la temporisation en fonction des conditions d'exploitation de ligne rend surtout le problème de la sélection beaucoup moins simple que l'on a pu l'affirmer jusqu'ici. Dans les

exemples numériques simples que nous avons choisis un peu au hasard, nous avons vu que l'impédance apparente mesurée par un relais peut varier dans le rapport de 1 à 3, on pourrait d'ailleurs trouver des cas où ce rapport serait encore plus grand, en considérant, par exemple, la présence d'une ou de plusieurs lignes voisines de la première.

Il est donc nécessaire de donner aux différents relais échelonnés le long d'une ligne, des caractéristiques temps-impédance beaucoup plus relevées vers l'axe des temps que ne l'exige la théorie simple généralement admise et ceci peut conduire, pour certaines positions du défaut et pour certaines conditions d'exploitation, à des temporisations considérables très souvent incompatibles avec le fonctionnement stable du réseau.

En résumé, le fait que les relais d'impédance ne puissent pas avoir une temporisation indépendante des conditions d'exploitation de la ligne protégée — au moins dans le cas de défauts à la terre — retire à ces appareils le caractère de simplicité et d'universalité que certains ont voulu leur prêter, et l'établissement de leurs caractéristiques exige une étude approfondie dans chaque cas particulier.

---

# TRAVAUX DES SECTIONS

---

## SOMMAIRE

- 1<sup>re</sup> SECTION. — Le moteur Dassenoy (M. DE PISTOYE), p. 95. — Un nouveau type de moteur asynchrone compensé (M. DE PISTOYE), p. 99.
- 4<sup>e</sup> SECTION. — Travaux de la 2<sup>e</sup> Section de la Commission Mixte internationale chargée de la protection des canalisations souterraines contre les corrosions (H. BRYLINSKI), p. 99. — La stabilité et la limitation des court-circuits dans les réseaux H. T. (M. LANGLOIS-BERTHELOT), p. 101.
- 5<sup>e</sup> SECTION. — La protection du synchronisme sur les transmissions radiotélégraphiques Baudot-Verdan (M. BONNIN), p. 101. — Le cinquantenaire du téléphone à Paris (M. REYNAUD-BONIN), p. 101. — Présentation des reproducteurs électriques de phonographes (M. TOULON), p. 105.

## 1<sup>re</sup> SECTION. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

Président : M. Paul GIRAULT.

SÉANCE DU 18 OCTOBRE 1929. — M. DE PISTOYE présente la note ci-après sur le *moteur Dassenoy* <sup>(1)</sup> :

Ce moteur a un stator ordinaire de moteur asynchrone.

Le rotor est double ; il comprend deux rotors  $R_1$  et  $R_2$  déplaçables axialement de façon à pouvoir venir se placer soit l'un, soit l'autre, en face du fer du stator.

L'un  $R_1$ , est un rotor à cage d'écureuil ordinaire, l'autre  $R_2$ , est formé d'un fer cylindrique feuilleté sans aucun bobinage ; ce dernier est un peu moins long axialement que le fer du stator.

Au démarrage, ce dernier rotor est en face du fer du stator ainsi que le bord (gauche sur la figure) du rotor à cage  $R_1$ . A ce moment les deux rotors sont fous sur l'arbre. Le flux émané du stator passe en majeure partie dans  $R_2$ , rotor sans bobinage, et n'y produit aucun couple ; mais quelques lignes de force passent dans  $R_1$  produisant un courant dans la cage correspondante, d'où résulte un petit couple, qui suffit pour démarrer les deux rotors fous. Les rotors se mettent

---

(1) E. T. Z. 14 décembre 1911, 26 juin 1913 ; Brevet français 417 à 529.

en vitesse. Un déplacement axial des rotors est produit soit à la main par vis, soit automatiquement par succion magnétique ; à fin de course de ce déplacement, quand le rotor  $R_1$  est venu en face du stator, l'embrayage des rotors sur l'arbre se produit par friction, et, à ce moment, l'arbre et l'appareil entraîné par celui-ci démarrent à leur tour.

L'attraction magnétique du rotor par le stator, produisant son déplacement de la position de démarrage à celle de marche, s'explique de la manière suivante : l'attraction magnétique tend toujours à mettre le rotor devant le stator dans la position de réluctance minima.

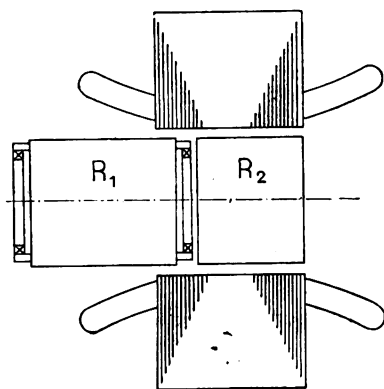


Figure 1.

A l'arrêt, et aux faibles vitesses, le flux passe librement en  $R_2$ , tandis que les courants induits dans le rotor à cage  $R_1$  tendent à s'opposer au passage du flux, puisque la force magnétomotrice du rotor est toujours opposée à celle du stator. La réluctance opposée au passage du flux dans le rotor sans cage est donc moindre que dans le rotor à cage, et l'attraction magnétique maintient le rotor sans cage devant le stator à l'arrêt et pendant la plus grande partie du démarrage, et ceci, malgré un ressort antagoniste qui tend à repousser  $R_2$  hors du champ, et à introduire  $R_1$  dans le champ.

Quand on arrive au voisinage du synchronisme les courants induits dans le rotor  $R_1$  sont faibles, puisque ce rotor tourne à peu près à la même vitesse que le champ. Les courants rotoriques de  $R_1$  étant faibles, la réluctance offerte au passage du flux dans  $R_1$  n'est guère plus grande que dans  $R_2$ , et l'attraction magnétique qui tend à maintenir  $R_2$  devant le stator est faible. Le ressort pousse alors  $R_2$  hors

du champ et y introduit  $R_1$ . L'embrayage se produit à fin de course de ce mouvement, comme nous l'avons dit.

Il y a lieu de remarquer que, à la position de démarrage le rotor  $R_1$  étant presque complètement hors du stator, la réactance de self-induction de sa cage est assez notablement diminuée, tandis que sa résistance reste naturellement constante. Son impédance est donc sensiblement diminuée, et une force électromotrice assez faible suffit à y produire un courant notable, donnant un couple suffisant pour assurer le démarrage à vide. Ceci explique comment un petit nombre de lignes de forces issues du stator et pénétrant dans  $R_1$  suffit à démarrer le rotor.

Ce moteur peut être assimilé, en somme, à un moteur muni d'un embrayage centrifuge puisque l'accouplement ne se produit que près du synchronisme. La limitation du courant de démarrage, au lieu d'être réglée par un coupleur étoile-triangle, résulte ici du déplacement axial du rotor, et est automatique. Toute la manœuvre se réduit à la fermeture de l'interrupteur du stator, qui donne son démarrage à faible courant et l'embrayage à la fin de la mise en vitesse.

Ce système est fort ingénieux, et théoriquement très satisfaisant. Il reste à savoir comment il se comporte en pratique, car l'embrayage à friction doit être assez sensible à l'état des surfaces en contact (poussières, huile, etc...). Le couple maximum du moteur est limité par cet embrayage. M. DASSENOY fait valoir cet avantage qui évite les accidents dus à une surcharge intempestive du moteur. Mais il est permis de se demander si ce couple maximum n'est pas variable suivant que l'embrayage sera sec ou que quelques gouttes d'huile auront pénétré jusqu'à lui.

De même le coulissage axial du fer du rotor sur l'arbre peut présenter quelques difficultés si l'atmosphère est chargée de poussières ; les dispositifs de mise en court-circuit et de relevage des balais des moteurs à bagues ordinaires donnent lieu quelquefois à des coincements en pareil cas, et ici la difficulté est probablement accrue, car le poids est augmenté et la manœuvre doit se faire automatiquement sous l'action d'un ressort dont la tension est fixe, tandis que la main peut pousser plus fort si la mise en court-circuit est coincée.

Néanmoins, ce sont là de petites difficultés mécaniques qu'une bonne construction peut résoudre, et qui ne se présentent en tout cas que dans un nombre limité d'applications. Ce moteur doit donc être

considéré comme un type intéressant de moteur à embrayage centrifuge.

M. RIEUNIER rend compte des essais qui ont été faits à la demande de M. DASSENOY, sur un moteur de son système. Ces essais ont eu lieu à Courbevoie, dans les mêmes conditions où avaient déjà été essayés au cours de l'hiver dernier, un certain nombre de moteurs à cage, à double cage, etc...

Ces essais avaient pour but, en décelant la présence ou l'absence, sur un réseau basse tension, des chutes de tension accompagnant d'ordinaire la mise en service de ces divers moteurs, de renseigner les différentes commissions ou sous-commissions compétentes de la Société Française des Electriciens, du Syndicat Professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique, de l'Union des Syndicats de l'Electricité. Il rappelle que ces commissions sont des organes d'étude ayant pour mission dans le cas présent l'élaboration d'un règlement général.

M. RIEUNIER rappelle que dans tous ces essais se présente une difficulté commune : celle de distinguer entre les effets de l'appel d'intensité à la fermeture de l'interrupteur, et ceux de l'appel d'intensité dû au démarrage de la charge mécanique.

Une confusion se produit souvent entre ces deux grandeurs, en raison de leur simultanéité. Il faut s'en garder dans l'élaboration d'un règlement, celui-ci ne pouvant s'en tenir qu'à des indications générales et indépendantes du fonctionnement de la machine entraînée.

Dans le moteur Dassenoy, qui n'a pas été conçu, paraît-il, plus spécialement en vue des applications urbaines, la limitation automatique de puissance (ou plus rigoureusement d'intensité absorbée) résultant de l'action électro-magnétique peut, de par le fonctionnement mécanique de l'embrayage, compliquer encore la question.

M. GUILLON indique que le moteur Dassenoy a été créé surtout en vue des usages agricoles, et que dans ces applications il donne toute satisfaction ; il a parmi beaucoup d'avantages, celui de fournir, grâce à son automaticité, une sécurité parfaite en cas de coupure fortuite du courant par le secteur ; il est construit avec embrayage auto-

matique pour toutes puissances inférieures à 15 ch ; pour des puissances supérieures à 15 ch et dépassant parfois 100 ch, l'embrayage est effectué à la main.

M. DE PISTOYE résume le rapport qu'il doit présenter à la Semaine d'octobre sur « *un nouveau type de moteur asynchrone compensé* » <sup>(1)</sup>.

#### **4<sup>e</sup> SECTION. — APPAREILLAGE. CANALISATIONS. DISTRIBUTION GÉNÉRALE. TRACTION**

Président : M. DAGUERRE.

SÉANCE DU 14 NOVEMBRE 1929. — I. — *Travaux de la 2<sup>e</sup> Section de la Commission mixte internationale chargée de la protection des canalisations souterraines contre les corrosions.*

M. BRYLINSKI rappelle, en premier lieu, l'origine du Comité consultatif international des communications téléphoniques à grande distance (C.C.I.) dont le but est l'étude des perturbations apportées par les lignes à courant fort sur les lignes téléphoniques et télégraphiques, et des moyens propres à y remédier :

- Effets perturbateurs des harmoniques ;
- Limites tolérables du bruit induit dans les circuits aériens ;
- Influence de la mise à la terre du neutre, etc., etc...

A ce Comité, exclusivement constitué de techniciens des Administrations P.T.T. des différentes nations, les représentants des industries sont régulièrement invités, mais seulement avec voix consultative.

Par extension, le C.C.I. a institué une commission mixte internationale (C.M.I.) chargée de la préparation et de l'exécution d'expériences relatives à la protection des lignes télégraphiques et téléphoniques et des canalisations souterraines. Cette Commission est constituée des représentants des différentes Administrations P.T.T. et des grandes Associations industrielles ; ces derniers ayant voix délibérative.

La C.M.I. comprend deux sections :

---

(1) Ce rapport paraîtra in extenso dans un prochain Bulletin.

*Première Section.* — Coexistence des lignes d'énergie et des lignes de télé-communication.

*Deuxième Section.* — Protection des lignes de télé-communication et des canalisations souterraines contre les corrosions, section dont la présidence a été offerte à M. le Professeur CHAPPUIS, Chef du Service des recherches physiques à la Société du Gaz de Paris, qui dispose d'un Laboratoire de recherches parfaitement outillé.

La deuxième Section de la C.M.I. a établi un programme de travail pour les expériences relatives à la protection des lignes, programme auquel participent 4 Comités d'Etudes :

*Premier Comité :* Bibliothèque, fichier, statistiques ; ce Comité se tiendra en liaison avec le Bureau international de bibliographie dont le Siège est à Bruxelles.

Ce Comité constituera une documentation complète et une statistique des corrosions électrolytiques ou chimiques pour laquelle il fait appel à toutes les Compagnies, Administrations ou Associations qui possèdent ou contrôlent des canalisations souterraines.

*Deuxième Comité.* — Naissance des courants vagabonds. Méthodes de surveillance des réseaux utilisant du courant continu, exploitation de tractions électriques utilisant le rail comme conducteur, contrôle des installations pouvant donner naissance aux courants vagabonds, étude des moyens propres à diminuer l'intensité de ces courants.

*Troisième Comité.* — Effets des courants vagabonds. Mesures des différences de potentiel entre rails et conduites souterraines et le sol, mesures des différences de potentiel entre deux points du sol rapprochés ou éloignés. Mesure du courant dans les câbles et mesure des courants de sortie ; processus de la corrosion. Mesures de la résistance du sol et modification de cette résistance au cours du développement de l'électrolyse ; mesure du courant dans le sol ; est-elle possible ?

Protection des canalisations pour diminuer les courants d'entrée et de sortie, conduits isolants et joints isolants.

*Quatrième Comité.* — Etude des corrosions ou altérations d'origine diverses.

Ce Comité n'a pas encore établi de programme de travaux, la C.M.I.



attend une documentation des délégués anglais ayant particulièrement étudié la question.

Les réunions de la C.M.I. tenues cette année, en octobre, se sont terminées par la visite du Laboratoire de la Société du Gaz de Paris et de la Sous-Station Nation de la Société des Transports en Commun de la Région Parisienne.

A la Société du Gaz de Paris, les délégués se sont arrêtés sur les appareils employés par M. le Professeur CHAPPUIS pour l'étude de la corrosion et sur les puissants moyens de recherches dont dispose le laboratoire de cette Société.

En ce qui concerne la visite de la sous-station Nation de la S.T.C.R.P., M. BRYLINSKI signale les moyens mis en œuvre et les soins tout particuliers apportés par cette Société pour le contrôle des circuits de retour et l'équilibrage des feeders négatifs.

M. ALLIAUME ajoute que les méthodes appliquées à la S.T.C.R.P. dans le but de réduire les courants vagabonds issus des installations de tramways ont donné des résultats remarquables, réduisant ces courants pratiquement à zéro. Ces résultats, d'ailleurs sont reconnus par les exploitants de gaz et par l'Administration des P.T.T.

II. — M. LANGLOIS-BERTHELOT présente une communication sur *la stabilité et la limitation des court-circuits dans les réseaux H.T.* <sup>(1)</sup>.

## 5<sup>e</sup> SECTION. — TÉLÉGRAPHIE. TÉLÉPHONIE. TRANSMISSION PAR ONDES

Président : M. REYNAUD-BONIN

SÉANCE DU 4 OCTOBRE 1929. — I. — M. BONIN résume le rapport qu'il présentera à la Semaine d'Octobre sur « *la protection du synchronisme sur les transmissions radiotélégraphiques* BAUDOT-VERDAN <sup>(2)</sup> ».

II. — *Le cinquantenaire du téléphone à Paris* (20 septembre 1879). M. REYNAUD-BONIN présente à ce sujet l'extrait ci-après de l'ouvrage de M. MONTORIOI sur « les systèmes de télégraphie et téléphonie ».

---

(1) Le texte in extenso et la discussion de cette communication paraîtront dans un Bulletin ultérieur.

(2) Ce rapport a paru in extenso dans le Bulletin n° 97 de septembre 1929, p. 974.

EXTRAIT de l'ouvrage de M. E. MONTORIOI sur « *les Systèmes de télégraphie et téléphonie* », pages 581 à 583.

Le téléphone fit son apparition en Europe en 1877 : le 20 octobre, en effet, BREGUET présenta à l'Académie des Sciences un appareil prêté par BELL lui-même ; de son côté, PREECE l'introduisit en Angleterre le 31 du même mois ; enfin, le 23 novembre, le Dr ZETZSCHE expérimenta l'appareil à DRESDE.

L'Administration française entreprit presque aussitôt des expériences, d'abord entre le Bureau central télégraphique de Paris et un local de l'avenue de Breteuil, puis entre Paris et Versailles, et enfin sur divers fils télégraphiques, tels que Cherbourg-Caen, Calais-Boulogne, etc... Toutefois, elle ne crut pas devoir tout d'abord assumer la charge de mettre le système en service, et, en 1879, le Ministre des Postes et Télégraphes accorda, à diverses personnalités, l'autorisation d'installer des réseaux téléphoniques à Paris et dans les principales villes de province. Aucune organisation similaire n'existait encore en Europe. En 1880, la Société Générale des Téléphones racheta en bloc les diverses concessions et acquit ainsi un monopole de fait.

L'initiative française fut rapidement imitée dans les différents pays étrangers ; c'est ainsi que le premier réseau fut installé :

a) En 1880 : En Angleterre (Londres), en Belgique (Bruxelles), en Danemark (Copenhague), en Hollande (Amsterdam), en Norvège (Christiania), en Suisse (Zurich) ; le premier réseau allemand fut construit à Berlin en 1880, mais il fut tout d'abord réservé à la transmission et à la réception des télégrammes, entre le Bureau central et les différents quartiers ; c'est seulement en 1881 qu'il commença à servir pour les communications purement verbales ;

b) En 1881 : en Autriche (Vienne), en Italie (Turin), en Portugal (Lisbonne), en Suède (Stockholm) ;

c) En 1882 : en Hongrie (Budapest), en Russie (Moscou) ;

d) En 1883 : en Chine (Hong-Kong et Shanghai) ;

e) En 1885 : en Espagne (Madrid).

En 1884, le réseau français de la Société Générale des téléphones avait déjà pris une grande extension. A l'occasion de l'établissement d'un nouveau cahier des charges, diverses améliorations furent ap-

portées dans le service ; c'est ainsi que les abonnés eurent la faculté de transmettre et de recevoir leurs télégrammes, entre le bureau central et leur domicile ; des cabines téléphoniques publiques furent installées ; enfin, des réseaux suburbains étaient créés.

Entre temps, l'Administration des Postes et Télégraphes avait entrepris la construction de réseaux téléphoniques dans des villes qui, pour des raisons diverses, n'en avaient pas été pourvues par la Société Générale des Téléphones ; en 1884, certaines de ces villes étaient reliées

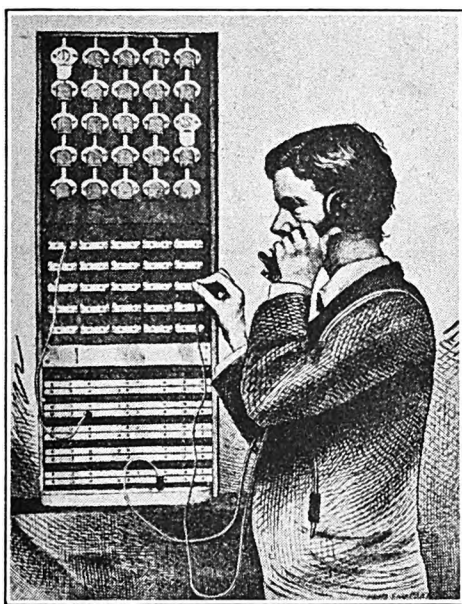


Figure 1.

entre elles, dans les limites de distance permises par le fonctionnement des systèmes alors en usage ; l'exploitation était assurée par les bureaux télégraphiques ; en 1887, les abonnés de tous les réseaux eurent la faculté de correspondre d'une ville à l'autre, à partir de leur domicile. Enfin, en 1889, à l'expiration de la concession de la Société Générale des Téléphones, l'Etat racheta en entier le réseau de cette Société et, à partir de cette époque, assura seul l'exploitation des téléphones en France.

*Tableaux téléphoniques.* — Dans les premiers bureaux centraux, les lignes étaient unifilaires et reliées à l'une des séries de barres d'un

*commutateur suisse* (fig. 1) ; les barres de l'autre série communiquaient chacune avec un appareil. On fit bientôt usage (en 1880), d'un autre système, consistant à rattacher chaque ligne, unifilaire ou bifilaire, à un conjoncteur dénommé Jack-knife <sup>(1)</sup> et à relier les abonnés, demandeur et demandé, à l'aide de deux fiches réunies par un cordon souple (fig. 2).

Dès l'origine du téléphone à Paris (1879), la Compagnie des Téléphones obtint la concession sur chaque voûte d'égout d'une largeur de 30 centimètres et d'une épaisseur de 10 pour mettre des crochets

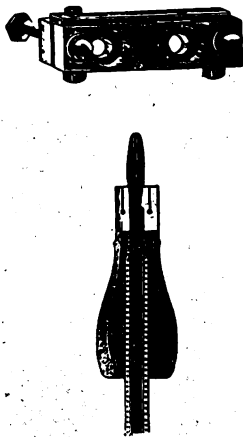


Figure 2. — Détails du tableau :  
jack et fiches.

soutenant les câbles téléphoniques. Les dispositions adoptées à cette époque permettaient de loger dans un égout 51 câbles à 7 circuits soit 357 abonnés. La ville de Paris exigeait une redevance de 10 francs par kilomètre de conducteurs à double fil et avait également imposé à la Compagnie des Téléphones que l'entretien de ces câbles en égout fut fait par l'Administration des Postes et des Télégraphes <sup>(2)</sup>.

Lorsque l'Administration des Postes et des Télégraphes racheta le réseau de la Compagnie des Téléphones de Paris, elle n'eut évidemment aucune difficulté à continuer à se servir du réseau des câbles téléphoniques en égout.

(1) Littéralement, *couteau de Jack*, du nom de son inventeur américain. Le mot *jack* a survécu au système, et sert couramment à désigner un conjoncteur téléphonique, à quelque genre qu'il appartienne.

(2) Renseignements extraits d'une histoire de la téléphonie datée de 1890 et rédigée par Julien BRAULT chargé du service des téléphones du Sénat.

Voici une annonce d'il y a cinquante ans <sup>(1)</sup> :

**Abonnez-vous au téléphone.** — Il y a déjà dans Paris quelques abonnés au téléphone. La Société des Téléphones Edison, 45, avenue de l'Opéra, annonce qu'elle reçoit les abonnements au tarif de 600 francs payable cinquante francs par mois ; l'abonnement comporte la pose et l'entretien des fils et appareils. Il est spécifié qu'aucune somme ne sera réclamée en plus.

III. — *Présentation des reproducteurs électriques de phonographes qui ont fait l'objet de la communication de M. CHARLIN à la séance du mois de juin dernier, par M. TOULON.*

M. TOULON présente le Pick-up de la Société Stellor, dont M. CHARLIN a donné la description au cours de la précédente séance. Pour obtenir une bonne reproduction musicale dans une grande salle, il est nécessaire d'associer le pick-up à un haut-parleur au moyen d'un amplificateur de puissance d'excellente qualité. La gamme extrêmement étendue des fréquences musicales rend la construction de cet amplificateur extrêmement difficile.

M. TOULON présente un des appareils « Stellor » utilisé pour les salles de cinématographe, et en signale les particularités :

Le haut-parleur est un appareil Rice-Kellog dont la bobine mobile (moving coil) est actionnée directement par la composante alternative du courant plaque des dernières lampes. La suppression du transformateur de sortie à rapport élevé (1/30) généralement employé, semble avantageuse, car il est fort difficile d'obtenir un fonctionnement satisfaisant d'un transformateur pour des fréquences aussi différentes que celles où s'étendent les fréquences acoustiques.

Dans la construction des amplificateurs musicaux, la principale difficulté que l'on rencontre est l'apparition d'harmoniques, provenant soit de la courbure de la caractéristique plaque, soit des courants grilles. Dans les appareils présentés, on a réduit ces défauts en utilisant entre étages des liaisons par résistance-capacité, ayant des caractéris-

---

(1) Extrait de « la Semaine à Paris » du 20 au 27 septembre 1929 sous le titre « Il y a cinquante ans ».

tiques convenables. Pour obtenir une puissance notable sans distortion avec les lampes actuelles, on est amené à polariser relativement peu les grilles. On réduit l'influence des courants grilles en rappelant leur potentiel à la valeur convenable au moyen d'une résistance relativement faible (80 000  $\Omega$  par exemple). Les capacités de liaison entre étages sont très élevées (10 microfarads par exemple). Avec de semblables montages, les fréquences les plus élevées comme les plus basses sont également transmises. On peut le vérifier pour les notes graves en déplaçant l'aiguille du pick-up de gauche à droite et vice-versa, le diffuseur avance et recule d'un mouvement concomitant. Un fonctionnement fidèle aux extrémités du spectre est indispensable pour obtenir une reproduction satisfaisante des régimes transitoires.

Un filtre d'aiguille disposé sur l'appareil permet éventuellement de limiter le maximum des fréquences transmises à diverses valeurs, suivant l'état d'usure du disque. Ce filtre, ainsi que le « Volume contrôle » qui permet de modifier la puissance du son produit, et le dispositif de passage qui permet de jouer sans interruption plusieurs disques, sont à la portée du musicien dont le rôle est d'interpréter le disque.

En terminant, M. TOULON signale les inconvénients graves qui résulteraient, pour les reproductions musicales radiophoniques, d'une limitation, dans l'avenir, de la bande passante à  $\pm 5\,000$  p: s. Il estime qu'il vaut mieux améliorer la qualité des émissions, en concentrant l'effort artistique et financier sur un petit nombre de stations, ayant une modulation irréprochable, plutôt que d'astreindre les postes actuels à déformer les timbres de leurs instruments en coupant les harmoniques.

#### *Discussion.*

M. le PRÉSIDENT. — En téléphonie commerciale, les filtres laissent passer les fréquences comprises entre 300 et 2 000 p: s, et de bonnes communications sont assurées sans entraîner de dépenses importantes. Mais, pour obtenir des transmissions musicales parfaites, il est nécessaire de laisser passer les ondes de 16 p: s à 20 000 p: s.

On étudie déjà pour relier les studios de radiophonie aux postes émetteurs de radiodiffusion la pose de câbles pupinisés répondant à ces desiderata. N'y aurait-il pas intérêt à étendre au-delà de 5 000 p: s les limites prévues pour les fréquences des ondes encadrant l'onde porteuse ?

M. CLAVIER. — M. TOULON se préoccupe de reproduire uniformément une gamme de fréquences acoustiques allant jusqu'à 20 000 périodes par seconde. Je pense que ni la réception radiotéléphonique, ni l'enregistrement des disques phonographiques n'ont atteint, à ce jour, une perfection justifiant des soins aussi rigoureux. Quand d'ailleurs on essaie de tracer la courbe de reproduction donnée par les meilleurs haut-parleurs, on est frappé par les irrégularités qui subsistent et de nouvelles vérifications expérimentales paraissent bien nécessaires.

D'autre part, les conditions d'une bonne reproduction musicale ne dépendent pas seulement de cette caractéristique. Il faudrait que l'égalité de réponse des appareils se maintienne pour des niveaux énergétiques très différents. Le rapport entre l'énergie à la sortie et à l'entrée, pour des niveaux énergétiques à l'entrée très différents, devrait faire l'objet d'une étude attentive, si l'on veut respecter les nuances de l'exécution, qui entrent pour beaucoup dans le plaisir de l'auditeur.

Il ne faut pas enfin oublier que traiter la musique comme une succession d'émissions continues de fréquence déterminée n'est qu'une approximation : si cela rend aisés les calculs et les essais, il serait imprudent de tout négliger des phénomènes transitoires, dont la reproduction exacte appelle encore bien des recherches.

Si donc on doit se montrer très satisfait des résultats obtenus, il importe, pour l'avenir, de bien dégager toutes les conditions souhaitables, et de s'efforcer d'y satisfaire progressivement.

M. MAGUNNA. — M. MAGUNNA signale qu'il existe actuellement des disques de phonographe tournant à 33 t/mn qui ont été enregistrés spécialement pour les reproductions cinématographiques. Avec ces disques aucune interprétation musicale n'est nécessaire, car on a pris soin à l'enregistrement de donner à chaque instrument sa puissance relative convenable.

M. TOULON. — M. TOULON répond qu'il lui paraîtrait plus facile d'effectuer le relaying par radio : il souhaite que tous les postes de relais de province travaillent exactement sur la même longueur d'onde afin de ne pas multiplier inutilement les bandes des fréquences accaparées pour la transmission d'un même radio-concert, comme cela se pratique malheureusement actuellement.

## OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ <sup>(1)</sup>

---

### PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

**Les Courants Alternatifs Industriels et leurs applications**, de RICHARD BERGER. Edité chez Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris 6<sup>e</sup>. Un volume 24×16 cm. de 126 pages (broché) 1929. (Don de l'Editeur).

### ELECTROCHIMIE, ÉLECTROMÉTALLURGIE

**Technische Elektrochimie** de M. le Professeur D'HURT ARNDT. Un volume broché de 708 pages 25×17 cm. Edité par Verlag von Ferdinand Eicke in Stuttgart (Don de l'Editeur). Prix Km. 52.

### APPAREILLAGE. — CANALISATION

**Electrification partielle du réseau de la Compagnie d'Orléans**, par M. PARODI. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte 6<sup>e</sup> année 1928 broché. Un volume de 31×22 cm. 300 pages (Don de l'Editeur). Prix 48 francs.

### TRANSMISSIONS PAR ONDES

**A la Conquête des Ondes : La T. S. F.**, par PAUL BRENOT. Edité chez Plon, 8, rue Garancière, Paris 6<sup>e</sup>. Un volume 19×14 cm. de 148 pages. (Don de l'Auteur).

**Telegraphy and telephony**, par E. MALLETT. Edité par Chapman and Hall Ltd. Henrietta Street W. C. 2-London. Un volume relié 22×14 cm. 325 pages (1929) (Don de l'Editeur). Prix 21 shillings.

### RECHERCHES PHYSIQUES

**Œuvres Scientifiques**, par JULES JANSSEN, membre de l'Institut de France. Edité par la Société d'Editions géographiques Maritimes et Coloniales, 184, boulevard Saint-Germain Paris 6<sup>e</sup>. Un volume de 25×16 cm broché 550 pages (Don de l'Auteur 1929).

### ENSEIGNEMENT

**Cours d'Electricité**, par M. VEAUX. Un volume de 24×16 cm. de 451 pages (Relié) 1929 (Don de l'Editeur).

### ANNUAIRES

**Annuaire de l'Union des Syndicats de l'Electricité année 1929**. Un volume relié 22×14 cm. de 2.000 pages. Don de l'Union des Syndicats de l'Electricité, 25, boulevard Malesherbes, Paris.

### FORMULAIRES, AIDE-MÉMOIRE, MANUELS

**Agenda Béranger 1930 à l'usage des Ingénieurs**, edité par Ch. BÉRANGER, 15, rue des Saints-Pères, à Paris, un volume relié de 400 pages 14×9 cm. (don de l'Editeur).

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens, 14, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff, de 14 à 18 heures, tous les jours sauf le dimanche.



# BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

---

## PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ.

**Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux.** — Volume 24 x 30 cm de 72 pages et de 19 gravures et 8 planches hors texte, par MM. Ch. MALÉGARIE, G. DESSUS, J. DUCOURNEAU, E. GAGE, E. GATEAU, R. NAMPON, R. TORRESI. Edité par la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité. (Don de la C.P.D.E.)

Dans cette intéressante monographie, richement reliée et ornée de très belles illustrations, M. Malégarie et ses collaborateurs montrent ce que devait être, après la guerre et en raison du développement considérable de la consommation d'énergie électrique, le programme d'alimentation de la Région Parisienne, et pourquoi il était nécessaire de faire participer la centrale d'Issy à l'exécution de ce programme par voie d'extension des installations existantes plutôt que par la création d'une usine nouvelle.

La brochure expose les raisons qui ont conduit à choisir les diverses dispositions adoptées. Il était impossible de renforcer la galerie d'eau ; il était intéressant de pouvoir utiliser pour produire partiellement la vapeur nécessaire, une chaufferie existante donnant la vapeur à la pression de 14 kg. cm<sup>2</sup> et à la température de 325°C. On augmenta la pression d'amont, le degré de surchauffe et on introduit deux groupes existant à la basse pression de 40.000 kW, dans le cycle des nouvelles turbines à haute pression. L'emploi du charbon pulvérisé concourut, d'autre part, à assurer la souplesse de la vaporisation. On adopta, en outre, le réchauffage de l'eau d'alimentation par prélèvements de vapeur dans les turbines à haute pression, tandis que l'air de combustion était chauffé par les gaz brûlés.

L'emploi de la vapeur à la pression de 44 kg. cm<sup>2</sup> et à la température de 450°C nécessite l'utilisation de métaux résistant à ces températures.

Une étude très complète a été faite des propriétés et de l'élaboration des divers métaux, en particulier pour la construction des collecteurs forgés de 10 m. de longueur et pesant 30 T. pour les chaudières de 1.800 m<sup>2</sup> de surface de chauffe vaporisant 100 T. à l'heure. On a déterminé ainsi les coefficients de sécurité sur lesquels on pouvait compter.

En résumé, les formules les plus récentes qui ont permis d'abaisser le prix de revient du kilowatt-heure ont été appliquées à la nouvelle centrale d'Issy.

Les phototypies qui illustrent le texte permettent de suivre les différentes phases de la construction.

Cette instructive monographie, par toutes les études qu'elle relate et les documents qu'elle contient présente donc le plus haut intérêt, aussi bien pour les constructeurs que pour les exploitants de stations centrales.

**Les courants alternatifs industriels et leurs applications**, par Richard BERGER, Ingénieur conseil en matières électriques et mécaniques (mécanicien A.I.Lg., électricien A.I.M.). 2<sup>e</sup> édition. 1<sup>re</sup> Partie : Exposé des principes et applications aux appareils industriels. Volume 16 x 25 cm de 126 pages, 144 figures. 1929. Prix broché : 25 fr. Editeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (7<sup>e</sup>). (Don de l'éditeur.)

L'auteur expose dans ce premier volume les principes des courants alternatifs et leur mise en œuvre dans les appareils industriels. Les applications proprement dites feront l'objet de volumes ultérieurs.

Après avoir rappelé les propriétés fondamentales du circuit électrique, qu'il éclaire par des comparaisons avec l'hydraulique, il analyse les effets des courants continu et alternatif, il étudie les courbes sinusoïdales, expose la méthode vectorielle, étudie la self induction, le fonctionnement des bobines à noyau de fer et des condensateurs.

Après un aperçu général sur les diélectriques gazeux, liquides et solides, il termine par une étude des courants polyphasés et des champs tournants.

Ce livre qui s'adresse à tous les praticiens de l'électricité et principalement aux monteurs ne fait appel qu'à des connaissances mathématiques élémentaires,

## MANUELS

**L'électricité à la maison**, par E. MAREC, Ingénieur électricien (A.-et-M.), (E. S. E.), volume 19×12 cm de 472 pages et 451 figures intercalées dans le texte de l'Encyclopédie Industrielle, 1929. Prix broché : 24 fr. Editeur : Librairie J.-B. Baillière et fils, 19, rue Hautefeuille, Paris (6<sup>e</sup>). (Don de l'Editeur.)

Les applications de l'électricité se trouvent, à l'heure actuelle, dans presque toutes les demeures, à la campagne comme à la ville, qu'il s'agisse d'éclairage, de chauffage électrique, de téléphone ou de T. S. F.

Nous devons donc tous posséder des notions élémentaires d'électricité, nous permettant de choisir et d'employer judicieusement les appareils, d'être en mesure de les installer et de contrôler.

Tel est le but que s'est proposé l'Auteur : il nous enseigne comment on produit l'énergie électrique et comment il convient de l'utiliser; comment on la mesure et comment on la paie; quels genres de canalisation et quels types d'appareillage il faut employer dans les divers cas de la pratique.

Un chapitre très substantiel est consacré à la technique de l'éclairage.

Les applications de l'électricité au chauffage domestique, à la cuisine, la description des appareils que l'on trouve dans le commerce, les appareils frigorifiques de ménages font l'objet d'un chapitre spécial. Il en est de même des applications à l'hygiène : appareils à ozone, ventilateurs, aspirateurs de poussières, chauffe-bains, etc., et de ce que l'Auteur appelle « les petits serveurs du home » : fers à repasser, à friser, sèche-cheveux, chauffe-biberons, etc. Les sonneries et les téléphones d'appartements, leurs schémas de montage sont étudiés dans des chapitres particuliers. Enfin, l'ouvrage se termine par une nomenclature des outils de l'électricien-amateur, des notions sur l'entretien des appareils et les réparations que l'on peut faire sans recourir à un professionnel.

## STATISTIQUES. — ANNUAIRES

**La France économique en 1928.** — Les Industries électriques, par Jacques-Henri ADAM. Extrait de la Revue d'économie politique, mai-juin 1928. — Une brochure 23 pages 19×25 cm, Paris, Sté anonyme du Recueil Sirey. (Don de l'auteur.)

L'auteur nous met au courant, par d'éloquents statistiques, de la situation économique en 1928, des Sociétés de production et de distribution de l'énergie électrique, d'une part et, de l'autre, des Sociétés de constructions électriques. Il résulte de cet exposé que les Sociétés de production sont fort prospères; et les cours cotés pour leurs actions témoignent d'ailleurs que cette prospérité n'est pas ignorée des capitalistes prévoyants. Les Sociétés de construction ont au contraire à lutter vaillamment pour s'assurer des débouchés sur le marché extérieur et lutter en France contre la concurrence étrangère. Espérons que les impôts d'une part, les tarifs douaniers de l'autre, leur seront, dans un avenir prochain, plus éléments qu'ils ne sont actuellement et remercions M. Adam de nous avoir si clairement mis au courant de leur situation.

**Annuaire électrotechnique Tchécoslovaque 1929, Elektrotechnická ročenka « E. S. C. »,** publié par l'Elektrotechnický Svaz Československý, Prague XII. Vocolova 3 ; rédaction M. V. Placek. Format normal A<sup>4</sup>, 296 pages, nombreuses illustrations et diagrammes, 2 tableaux en couleurs, 5 cartes. Prix relié : 200 couronnes tchécoslovaques. (Don du Comité technique tchécoslovaque.)

Cet ouvrage, édité dans la dixième année de l'existence de l'« E. S. C. » donne, après une revue générale de l'activité de l'Union, les nouvelles normes et les nouvelles prescriptions de sécurité adoptées en Tchécoslovaquie, et le tableau des marques de qualité attribuées par l'E. S. C. aux divers matériels électrotechniques. Une carte du pays avec indications du Service hydrométrique ; des renseignements sur l'industrie électrotechnique, sur les mouvements des prix, sur les exportations et les importations, sur l'activité du Service central de l'étalonnage ; la liste des brevets récents et des marques déposées se trouvent, en outre, dans l'ouvrage, qui donne aussi des renseignements sur l'instruction donnée aux électriciens et sur la bibliographie tchèque relative à l'électrotechnique.

La partie consacrée à la production et à la distribution de l'énergie électrique est précédée d'une vue d'ensemble de l'œuvre d'électrification ; elle donne une statistique détaillée des 456 usines centrales vendant de l'énergie électrique au public : La production totale du pays, comprenant l'énergie produite par les usines privées pour leurs propres besoins a été en 1927 de 1.700 millions de kWh soit 125 kWh par habitant indique une progression annuelle de 12,5 pour cent.

La longueur totale des lignes à haute tension a été en 1927 de 20.800 km. correspondant à une progression de 17,5 pour cent. L'annuaire donne encore : un tableau des 6.000 communes électrifiées avec indications du système de courant, de la tension de distribution, des secteurs correspondants, du nombre d'habitants et du prix de l'énergie.

Enfin, la partie consacrée aux adresses est terminée par une liste des Sociétés coopératives communales ou régionales de distribution de l'énergie électrique et des constructions du matériel électrique.

Cet annuaire constitue un document statistique très complet du plus haut intérêt pour les Constructeurs et Ingénieurs électriciens. Bien que n'étant pas rédigé en français, les renseignements numériques contenus dans les tableaux de l'ouvrage seront consultés avec fruit par nos lecteurs.

# IL Y A TRENTE ANS

---

## 1° Réunion ordinaire mensuelle du 10 janvier 1900

Présidence de M. J. VIOLLE, *Président*.

M. Cuénod fait une communication sur la « Distribution de la force à de grandes distances par l'électricité, au moyen du courant continu à intensité constante ».

Dans ce système, étudié et appliqué dès 1889 par M. R. Thury, toutes les génératrices contribuent à fournir la tension totale de transport, cette tension étant utilisée dans des réceptrices, n'est qu'une partie de la tension totale proportionnelle à leur puissance propre. Les difficultés d'isolement et de construction sont réduites.

Le système Thury n'exige pas de transformateurs de tension, sauf dans le cas où il est employé pour l'alimentation de réseaux d'éclairage ; il s'applique très avantageusement à l'exploitation de sources d'énergie nombreuses, mais peu importantes réparties sur un circuit étendu desservant un grand nombre de localités très disséminées.

M. Cuénod décrit l'appareillage nécessaire à la mise en service des machines au réglage automatique de la tension des génératrices et de la vitesse des moteurs et M. Thury indique des détails de construction puis fait la description sommaire des quatorze installations (18 000 ch) à exécuter par la Compagnie de l'Industrie électrique de Genève

## 2° Bulletin

Un congrès international d'Electricité s'ouvrira à Paris, le 18 août 1900, au Palais des Congrès de l'Exposition. Le Président de la Commission d'Organisation est M. Mascart, membre de l'Institut, Directeur du Bureau central météorologique.

BULLETIN  
DE LA  
**SOCIÉTÉ FRANÇAISE**  
DES  
**ÉLECTRICIENS**

---

**SOMMAIRE**

---

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Assemblée générale ordinaire du samedi 4 janvier 1930, p. 114.  
Election de M. Paul JANET comme Président d'Honneur, p. 114.  
Renouvellement partiel du Bureau et du Comité. p. 114.  
Admissions des Membres titulaires, p. 117.  
Don à l'Ecole, p. 118.  
Allocution du Président sortant et du Président entrant, p. 119.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Situation de l'Eclairage public par l'électricité en France et développement pendant l'année 1928 (M. LESOUPLE), p. 120. — Les câbles souterrains à haute tension (M. DELON), p. 200.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS

- a) Nomination de M. Paul Janet, Président d'Honneur, p. 221.
- b) Attribution de la Médaille Mascart en 1930, p. 221.
- c) Errata au Bulletin de Janvier 1930, p. 221.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 222.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 222.

IL Y A TRENTE ANS, p. 224.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.  
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

# COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

---

## ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ORDINAIRE

du Samedi 4 Janvier 1930

---

Présidence de M. BUNET

L'Assemblée est ouverte à 16 h. 30.

M. le Président invite les Membres qui n'auraient pas envoyé leur vote pour l'élection d'un Président d'Honneur pour le renouvellement partiel du Bureau du Comité et de la Commission des Comptes à déposer leur bulletin dans l'urne.

MM. les scrutateurs dépouillent le scrutin dont M. le Président proclame le résultat donné ci-après :

### ELECTION D'UN PRÉSIDENT D'HONNEUR

M. Paul JANET, Membre de l'Institut, Directeur de l'Ecole supérieure et du Laboratoire central d'Electricité, est élu Président d'honneur à l'unanimité des 617 suffrages exprimés.

### ELECTIONS POUR LE RENOUVELLEMENT PARTIEL DU BUREAU ET DU COMITÉ :

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Suffrages exprimés ..... | 617 |
| Bulletins nuls .....     | 8   |
| <hr/>                    |     |
| Nombre de votants .....  | 625 |
| Majorité .....           | 314 |

Sont élus :

*Président pour l'exercice 1931*

M. CHAUMAT (H.), Professeur au Conservatoire national des  
Arts et Métiers ..... 608 voix

*Vice-Présidents :**1<sup>re</sup> Section*

(Production et Utilisation mécanique de l'Electricité)

M. DARRIEUS (G.), Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique ..... 615 voix

*6<sup>e</sup> Section*

(Recherches physiques, Electrophysiologie, Instruments de mesure)

M. CELLERIER (J.), Directeur du Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers ..... 609 voix

*Secrétaire général :*

M. CARDON (M.), Ingénieur, Chef du Service des machines à la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans. 616 voix

*Trésorier :*

M. MEYER (M.), Directeur de la Compagnie générale des Travaux d'Eclairage et de Force ..... 612 voix

*Secrétaires :**1<sup>re</sup> Section*

(Production et Utilisation mécanique de l'Electricité)

M. LACHAISE (R.), Inspecteur divisionnaire à la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans ..... 615 voix

*4<sup>e</sup> Section*

(Appareillage, Canalisation, Distribution générale, Traction)

M. GASTINE (J.), Inspecteur à la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans ..... 615 voix

*Membres**pour trois ans*

M. ALLIAUME (R.), Inspecteur principal à la Société des Transports en commun de la région parisienne, Secrétaire sortant ..... 616 voix

|                                                                                                                                                                        |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| M. AUBERT (E.), Administrateur Directeur général de la<br>Compagnie Ouest-Lumière .....                                                                                | 613 voix |
| M. BARILLOT (A.), Ingénieur, Chef du Service électrique à<br>la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans. ....                                                  | 614 voix |
| M. DAUVILLIER (A.), Attaché au Laboratoire de recherches<br>physiques sur les rayons X .....                                                                           | 616 voix |
| M. DUVAL (Ch.), Directeur des Services électriques de la<br>Société générale d'Entreprises .....                                                                       | 614 voix |
| M. FALLOU (J.), Ingénieur à l'Union d'Electricité, Secrè-<br>taire sortant .....                                                                                       | 615 voix |
| M. FÉRY (Ch.), Professeur à l'Ecole de physique et chimie<br>industrielles .....                                                                                       | 615 voix |
| M. GENISSIEU (E.), Ingénieur en chef du service central des<br>Forces hydrauliques et des distributions d'énergie<br>électrique au Ministère des Travaux Publics ..... | 615 voix |
| M. GEOFFROY (E.), Président du Conseil d'Administration<br>de la Société anonyme Geoffroy-Delore .....                                                                 | 615 voix |
| M. GIRAULT (P.), Ingénieur au Service des études de l'Als-<br>thom, Vice-Président sortant .....                                                                       | 615 voix |
| M. JOUAUST (R.), Sous-Directeur du Laboratoire central<br>d'Electricité .....                                                                                          | 616 voix |
| M. LEBOUCHER (P.), Ingénieur en chef des Services tech-<br>niques de la Compagnie des Chemins de fer du Midi. ....                                                     | 614 voix |
| M. LIÉNARD (A.), Directeur de l'Ecole nationale supérieure<br>des Mines, Vice-Président sortant .....                                                                  | 616 voix |
| M. MERCIER (E.), Administrateur-Délégué de l'Union<br>d'Electricité .....                                                                                              | 613 voix |
| M. PESTARINI (J.), Ingénieur à l'Alsthom .....                                                                                                                         | 613 voix |
| M. VALBREUZE (R. de), Administrateur-Délégué de la So-<br>ciété pour le perfectionnement de l'Eclairage, Com-<br>missaire aux comptes sortant .....                    | 614 voix |



*Membre  
pour un an*

**M. PISTOYE (Henri de)**, Ingénieur en chef des Services électriques de la Maison Bréguet ..... 612 voix

*Commission des Comptes :*

**M. SCHWARBERG (E.-G.)**, Directeur général de la Compagnie Electro-Mécanique ..... 614 voix

**M. GIROUSSE (G.)**, Administrateur-Délégué du Nord-Lumière ..... 615 voix

**M. BOUSQUET (P. du)**, Administrateur-Délégué de la Compagnie électrique du Nord ..... 613 voix

## RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 4 Janvier 1930

La séance est ouverte à 17 heures.

Le procès-verbal est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

**Acheritégny (Jean)**, Attaché au service des Recherches à la Radiotechnique, 44, avenue Gabriel, Paris 8<sup>e</sup>. — Présenté par MM. Lecorguillier et Boulouvard.

**Bertrand (Alix, Charles)**, Chef du Service d'entretien électrique des Usines d'Argenteuil de la Société « Electro-Câble », 5, rue Léon-Delhomme, Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Rieunier et Dupui.

**Buss (Charles, Otto)**, Ingénieur E. C. P., Directeur de l'Usine du Havre de la Cie Electro-Mécanique, 16, boulevard Sadi-Carnot, au Havre (Seine-Inférieure). — Présenté par MM. Schwarberg et Pouilliot.

**Chappée (Ferdinand, Léon)**, Ingénieur E. S. E., Licencié ès sciences. Inspecteur divisionnaire au Chemin de fer de Paris à Orléans, 35, boulevard Auguste-Blanqui, Paris (13<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Barillot et Cardon.

**Devaud (Louis, Henri, Jean)**, Inspecteur à la Cie du Chemin de fer d'Orléans, 41, rue Jussieu, à Paris (5<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Cardon et Barillot.

**Eschwege (Pierre, Paul)**, adjoint à la Direction de la Société française des Poteaux Electriques, 67, rue de Dunkerque. Domicile : 10, rue de Longchamp, à Paris (16<sup>e</sup>). Présenté par MM. Eschwege et Girousse.

**Gaude (Armand, Sylvestre)**, Directeur de la Société d'Electricité de la vallée du Rhône, 34 bis, route de Vienne, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Barsu et Dumont.

**Girodroux** (Jacques, Marie, Frédéric), Ingénieur I. E. G., Ingénieur au Service des Recherches à la Radiotechnique, 17, rue des Gourlis, à Rueil (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Lecorguillier et Boulouvard.

**Marchay** (Fernand), Adjoint à la Direction de la Société française des Poteaux Electriques, 67, rue de Dunkerque. Domicile: 3, avenue Daniel-Lesueur, Paris (7<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Iung et Girousse.

**Marinkovitch** (Milinko), Ingénieur aux Laboratoires Standard, 46, avenue de Breteuil, ingénieur I. E. T. et E. S. E., 8, Villa Ségur, à Paris (7<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Lecorguillier et Boulouvard.

**Morance** (Louis, Luc, Armand), Directeur de la Société française des Poteaux électriques, 55, rue Henry-Pauquet, à Creil (Oise) — Présenté par MM. Eschwege et Gouverneur.

**Nouhaud** (Charles), Ingénieur à la Société de Mécanique de Gennevilliers, 70, avenue Saint-Mandé, à Paris (12<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Dupui et Rieunier.

**Roche** (Edmond), Ingénieur à la Société Interrégionale de Distribution d'énergie électrique, Château de la Bastille, à Brive (Corrèze). — Présenté par MM. Boutonnet et L. Rousseau.

**Samuel** (René, Adrien, Paul), Ingénieur à la Compagnie des chemins de fer de Paris à Orléans, détaché à l'Office Central d'Etudes de Matériel de Chemin de fer, 50, rue Jenner, à Paris (13<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Cardon et Ferrand.

Ces Candidats sont élus Membres titulaires de la Société Française des Electriciens.

M. le Président annonce que Mme Hauvette-Michelin a fait à l'Ecole un don de 120 000 francs.

M. d'AUDEVILLE présente une communication sur les *Stations centrales et les sous-stations automatiques* (1).

Après avoir parlé des installations semi-automatiques qui exigent encore une certaine intervention du personnel, l'auteur expose les solutions qui ont permis d'obtenir un fonctionnement entièrement automatique et il indique les avantages qui en ont été retirés tant au point de vue de la dépense d'exploitation que de la sécurité du fonctionnement.

M. le Président remercie vivement le conférencier de son très intéressant exposé.

M. Roy présente deux films montrant la *fabrication des redresseurs à vapeur de mercure* de la Maison Siemens (2).

M. le Président remercie M. Roy de cette présentation qui a appris beaucoup de choses à ses auditeurs ; il annonce que la discussion de cette communication sera reportée à la Séance de Février.

(1) Cette communication sera publiée in-extenso dans un Bulletin ultérieur.

(2) Un résumé de cette communication paraîtra dans un bulletin ultérieur.

Il prononce ensuite l'allocution suivante :

MES CHERS COLLÈGUES,

Une année s'est écoulée depuis que je préside vos séances. Elle m'a paru bien courte. Mais ne semble-t-il pas à tous ceux qui ont coutume de se réunir dans cette Salle que nos présidents se succèdent avec une cadence qui ne laisse pas d'être un peu inquiétante ? C'est celle qui marque le terme de nos années, et quand nous nous souvenons de l'aspect de l'assemblée lors de telle communication que nous fîmes ou que nous écoutâmes, que nous revoyons le président d'alors, nous mesurons le temps écoulé par le nombre des successeurs que nous avons vus depuis occuper son fauteuil, parfois non sans quelque mélancolie, en nous sentant un peu moins jeunes.

Vous avez choisi pour nouveau président notre collègue M. Parodi. Il serait fort superflu de rappeler sa carrière et ses travaux. Nous les connaissons bien, et tout particulièrement la part qu'il a prise au développement de nos chemins de fer électriques et nos grandes lignes de transport. Nous avons vu les soins qu'il apporte à la réussite de ses entreprises. Sous sa présidence, notre société aura certainement une année de développement marqué et de succès.

Mon cher Parodi, je vous invite à prendre la présidence de notre Société.

M. PARODI prend possession du fauteuil présidentiel et après avoir remercié M. BUNET il ajoute qu'il fera de son mieux pour que ses collègues ne regrettent pas le choix qu'ils ont fait en le nommant Président.

La séance est levée à 18 h. 30.

---

# SITUATION DE L'ÉCLAIRAGE PUBLIC PAR L'ÉLECTRICITÉ EN FRANCE. ET DÉVELOPPEMENT PENDANT L'ANNÉE 1928 <sup>1</sup>

par M. E. H. LESOUPLE

*Ingénieur des Arts et Manufactures,  
Ingénieur en Chef de l'Exploitation E. P. à la Compagnie parisienne  
de Distribution d'Electricité.*

---

*Observations générales: situation actuelle; hauteur et espacement des foyers; type et puissance des lampes; lampes à incandescence; supports des foyers; appareils; alimentation des foyers; commande des foyers; cellules photoélectriques; — Extension de l'éclairage public à Paris en 1928; appareils d'éclairage, globes, lampes; supports des foyers; — Extension de l'éclairage public dans la banlieue de Paris: situation et extension de l'éclairage public en province. Conclusion. — Annexe: description du relais ST 122 pour la commande à distance des contacteurs par courant à haute fréquence.*

## I. — OBSERVATIONS GÉNÉRALES

### 1° SITUATION ACTUELLE

Malgré les nombreux avantages que présente l'emploi de l'électricité pour l'éclairage des rues, ce système ne s'est pas développé en France autant qu'on pourrait le croire.

Cela tient à ce que beaucoup de Villes continuent à utiliser les installations d'éclairage au gaz préexistantes dont le remplacement ne se fait que progressivement.

C'est ainsi qu'à Paris pour 7 789 foyers électriques installés au 31 décembre 1928, il existe encore 41 250 foyers alimentés au gaz B.P. et 6 720 foyers environ alimentés au gaz surpressé.

Le tableau n° 1 ci-joint donne, pour un certain nombre de Villes et d'agglomérations, le nombre approximatif de foyers installés.

En ce qui concerne les installations réalisées en 1928 dans les différentes villes, il y a lieu de remarquer que leurs caractéristiques dépendent trop directement des crédits qui leur sont affectés et de la nature même des localités pour qu'il soit possible de dégager bien nettement de leur examen les tendances de leur évolution.

Toutefois, avant de décrire les principaux travaux exécutés pour l'éclairage public en France pendant l'année écoulée, nous avons essayé, autant que cela était possible, de mettre en évidence les modi-

---

(1) Cette communication présentée devant la 2<sup>e</sup> Section de la Société Française des Electriciens a pu être publiée in-extenso grâce à une importante contribution de la Compagnie parisienne de distribution d'Electricité.

TABLEAU I.

| NOMS DES VILLES                       | FOYERS<br>avec suspension<br>axiale | AUTRES FOYERS | TOTAL DES FOYERS<br>ÉLECTRIQUES | % DE FOYERS<br>avec suspension<br>axiale | PUISSANCE TOTALE<br>installée<br>en kVA | NOMBRE<br>de kilomètres<br>de<br>voies éclairées |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| PARIS. ....                           | 8                                   | 7 781         | 7 789                           | 1                                        | 4 445                                   | 205                                              |
| MARSEILLE.....                        | 18 943                              | 546           | 19 489                          | 97                                       | 1 800                                   | 590                                              |
| BORDEAUX.....                         | Majorité                            |               | 3 607                           |                                          | 1 050                                   |                                                  |
| COMMUNES OUEST LU-<br>MIÈRE.....      |                                     |               | 2 454                           |                                          | 480                                     | 100                                              |
| ROUEN.....                            | 8                                   | 406           | 414                             | 2                                        | 361                                     | 9                                                |
| GRENOBLE.....                         | 222                                 | 1 649         | 1 841                           | 12                                       |                                         |                                                  |
| SOCIÉTÉ GAZ ET<br>EAUX.....           |                                     |               |                                 |                                          |                                         |                                                  |
| CHERBOURG, VALO-<br>GNES, etc.....    |                                     |               | 1 700                           |                                          | 260                                     | 70                                               |
| LE HAVRE.....                         | 122                                 | 1 467         | 1 589                           | 7,6                                      |                                         |                                                  |
| COMMUNES EST LU-<br>MIÈRE.....        | 590                                 | 2 084         | 2 674                           | 22                                       | 250                                     | 40                                               |
| AVIGNON.....                          | 0                                   | 1 329         | 1 329                           | 0                                        |                                         | 50                                               |
| STRASBOURG.....                       |                                     |               | 570                             |                                          | 180                                     |                                                  |
| NANTES.....                           | 0                                   | 1 075         | 1 075                           | 0                                        | 180                                     | 28                                               |
| BREST.....                            | 0                                   | 1 214         | 1 214                           | 0                                        |                                         |                                                  |
| LORIENT.....                          |                                     |               | 751                             |                                          | 150                                     | 52                                               |
| LYON.....                             | Majorité                            |               | 407                             |                                          | 148,6                                   | 6                                                |
| CANNES.....                           | 365                                 | 0             | 365                             | 100                                      | 148                                     | 14,6                                             |
| LIMOGES.....                          | 470                                 | 630           | 1 100                           | 42                                       |                                         |                                                  |
| LILLE ET COMMUNES<br>ENVIRONNANTES... | 8                                   | 574           | 582                             | 1,3                                      |                                         |                                                  |
| NANCY.....                            | 40                                  | 670           | 710                             | 5,6                                      | 143                                     | 13                                               |
| MULHOUSE.....                         |                                     |               |                                 |                                          | 120                                     | 12                                               |
| AURILLAC.....                         | 95                                  | 537           | 632                             | 15                                       | 108,8                                   | 20                                               |
| BANLIEUE LYONNAISE.                   | 420                                 | 1 683         | 2 103                           | 20                                       | 92                                      |                                                  |
| AIX-LES-BAINS.....                    | 208                                 | 517           | 725                             | 28                                       |                                         |                                                  |
| VICHY.....                            | Majorité                            |               | 213                             |                                          | 80                                      |                                                  |
| BIARRITZ.....                         |                                     |               | 477                             |                                          | 74                                      |                                                  |
| SAINT-NAZAIRE,<br>PLOERMEL, etc...    |                                     |               | 400                             |                                          | 60                                      | 30                                               |
| MONTLUÇON.....                        | 0                                   | 388           | 388                             | 0                                        | 45,5                                    | 18                                               |
| NIMES.....                            | 244                                 | 6             | 250                             | 97                                       |                                         | 10                                               |
| NEVERS.....                           |                                     |               | 101                             |                                          | 35                                      | Carrefours                                       |
| RENNES.....                           | 0                                   | 127           | 127                             | 0                                        | 25                                      | & Places et<br>Arcades                           |
| BONE (ALGÉRIE)....                    |                                     |               | 49                              |                                          | 25                                      | 1                                                |
| RODEZ.....                            | 0                                   | 248           | 248                             | 0                                        | 23,6                                    | 10                                               |
| FOUGÈRES.....                         |                                     |               | 131                             |                                          | 21,5                                    | 36                                               |
| LONS-LE-SAUNIER...                    | 79                                  | 1             | 80                              | 99                                       | 20                                      | 8                                                |
| MONTPELLIER.....                      | 0                                   | 78            | 78                              | 0                                        |                                         |                                                  |
| CAHORS.....                           | 50                                  | 20            | 70                              | 72                                       | 17                                      |                                                  |
| AUTUN.....                            | 31                                  | 24            | 55                              | 56                                       | 12,8                                    | Discontinué                                      |
| MILLAU.....                           | 29                                  | 3             | 32                              | 90                                       | 8,85                                    |                                                  |
| RIOM.....                             |                                     |               | 113                             |                                          | 7,59                                    | 12                                               |

fications apportées aux caractéristiques principales adoptées antérieurement pour l'exécution des installations.

## 2° HAUTEUR ET ESPACEMENT DES FOYERS

Il y a une légère tendance à augmenter l'espacement ; toutefois, il reste plus généralement compris entre 30 et 50 m.

Pour éviter l'éblouissement, la hauteur des foyers s'accroît de plus en plus.

Les hauteurs de 8 à 10 m sont courantes dans les nouvelles installations (nous verrons plus loin qu'on a installé à Paris un candélabre à 3 branches dont les points lumineux sont à 11,25 m de hauteur).

En particulier, il est rare que l'on descende au-dessous de 8 m lorsqu'on emploie l'éclairage axial.

## 3° TYPE ET PUISSANCE DES LAMPES

Les lampes à arc continuent à s'effacer devant les lampes à incandescence.

C'est ainsi qu'à Paris, où il y a encore un grand nombre de ces appareils en service, 139 ont été supprimés en 1928 et que l'année suivante verra leur disparition complète.

Toutefois, il se pourrait que cette disparition ne soit que momentanée, car certains constructeurs ne désespèrent pas de rendre aux arcs la place qu'ils occupaient précédemment.

Dans ce but, les Etablissements « Koerting Mathiesen » ont construit deux nouveaux types de lampes : un pour le courant continu, l'autre pour le courant alternatif qui sont tous deux dérivés des lampes en vase clos « Carbone ».

Les caractéristiques principales de ces appareils sont les suivantes :

a) *Lampes pour courant continu* :

Intensité du courant : 30 A ;

Tension aux bornes de la lampe : 45 V ;

Durée de fonctionnement des charbons : 150 h ;

Rendement lumineux <sup>(1)</sup> : 23 lumens: Watt.

b) *Lampes pour courant alternatif* :

Intensité du courant : 15 A ;

Tension aux bornes de la lampe : 45 V ;

---

<sup>(1)</sup> Sensiblement équivalent à celui des lampes Bardon Carbone de même type.



TABLEAU II (suite). — *Eclairage public de Lynn (Massachusetts U.S.A.).*

| VOIES                               | CARACTÉRISTIQUES DES FOYERS LUMINEUX                 |                                                                                            |                         |                      |                                                 |                                         |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                     | Support                                              | Nature de la Source Lumineuse                                                              | Intensité en bougies    | Hauteur en mètres    | Dispositif                                      | Espacement en mètres                    |
| VOIES COMMERÇANTES DU CENTRE :      | Candélabre à 2 branches                              | Lampes à arc (magnétique)<br>Globe Alabaster                                               | 1 800                   | 6,70                 | Quinconce<br>Quinconce avec 2 app. simpl. inst. | 15 à 25<br>185 entre 2 grands appareils |
| »                                   | »                                                    | Lampe A. t. g.<br>Lampes à arc (magnétique)<br>Lampe A. t. g.                              | 1 500<br>1 800<br>1 500 | 6,70<br>4,40<br>5,20 | Quinconce<br>»                                  | 15 à 25<br>30                           |
| ARTÈRES A GRANDE CIRCULATION :      | Candélabre à 1 branche<br>»                          | Lampe A. t. g.<br>Lampes à arc (magnétique)<br>Lampe A. t. g.                              | 1 000<br>1 000          | 5,80<br>6,10         | Une file latérale<br>quinconce<br>Quinconce     | 40<br>45                                |
| a) Centre de la Ville.....          | Candélabre à potence                                 | Lampe A. t. g.<br>réfr. Holophane<br>»                                                     | 600<br>250              | 4,90<br>4,90         | Quinconce<br>»                                  | 45<br>60                                |
| b) Périphérie.....                  | Bras simple sur pot. télégr.                         | Lampe A. t. g.<br>réfr. Holophane<br>Lampe A. t. g.<br>Lampe A. t. g.<br>Réfl. parabolique | 250                     | 9,75                 | »                                               | 45 à 90                                 |
| QUARTIERS DE RÉSIDENCE :            | Candélabre à potence<br>Bras simple sur pot. télégr. | Lampe A. t. g.<br>réfr. Holophane<br>Lampe A. t. g.                                        |                         |                      |                                                 |                                         |
| a) Voies principales.....           | »                                                    | »                                                                                          |                         |                      |                                                 |                                         |
| b) Voies secondaires.....           | »                                                    | »                                                                                          |                         |                      |                                                 |                                         |
| Routes (au voisinage de la Ville) . | Applique sur pot. télégr.                            | »                                                                                          |                         |                      |                                                 |                                         |



Durée de fonctionnement des charbons : 180 h ;

Rendement lumineux : 23 Lumens: Watt.

Ces appareils ont sur les anciens types, les avantages suivants :

- a) grande fixité de l'arc ;
- b) diminution du dépôt résiduel sur le globe.

#### 4° LAMPES A INCANDESCENCE

On utilise maintenant, pour l'éclairage public, presque uniquement des lampes à atmosphère gazeuse. Seules, quelques très rares lampes à filament métallique dans le vide sont employées pour le jalonnement de certains chemins qui n'exigent que des foyers de très faible puissance.

Les lampes à deux filaments, permettant deux intensités d'éclairage, sont encore, sauf à Paris, peu utilisées malgré le *très grand intérêt* qu'elles présentent avec l'emploi des verreries Holophane (dans lesquelles les dimensions de la source doivent être aussi réduites que possible).

Les puissances des lampes sont très variables, depuis quelques dizaines de watts pour les lampes de jalonnement des voies peu fréquentées des faubourgs ou des petites villes jusqu'à 1 000 W et même plus pour l'éclairage intensif des artères centrales des grandes villes <sup>(1)</sup>.

La puissance la plus fréquemment utilisée pour les lampes, dans les Villes d'une certaine importance, est de 500 W.

#### 5° SUPPORTS DES FOYERS

##### A) *Suspensions axiales*

L'année 1928 a marqué une orientation très nette vers l'utilisation des suspensions axiales avec câbles porteurs.

Ces appareils triomphent dans presque toutes les Villes, sauf à Paris où, pour des raisons d'esthétique, on n'a pas encore envisagé leur emploi systématique dans les nouvelles installations d'éclairage public.

---

(1) A titre de comparaison, nous donnons le tableau n° 2 dressé par M. Reclus, Ingénieur des Arts et Manufactures, qui indique les principaux calibres utilisés dans les grandes Villes des Etats-Unis.

Nous croyons utile de rappeler ci-dessous les principaux avantages de ce mode de suspension, ainsi que les quelques inconvénients que l'emploi de ce système entraîne inévitablement :

Avantages :

- a) Prix de revient réduit <sup>(1)</sup> ;
- b) Eclairage plus grand et plus régulier de la chaussée ;

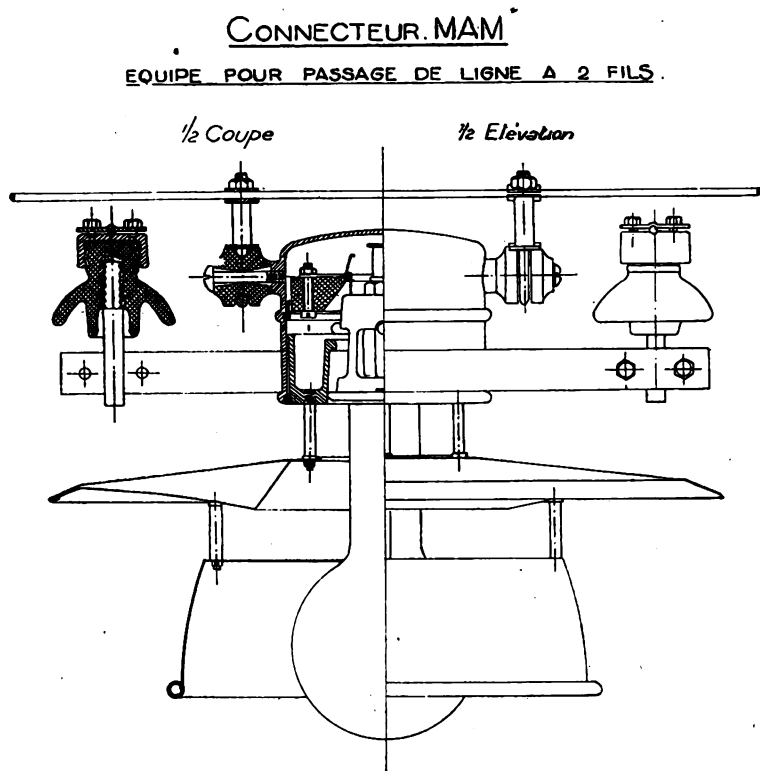


Fig. 1.

- c) Visibilité plus grande obtenue par l'élévation de la source et la diminution de l'éblouissement ;
- d) Suppression des candélabres et, de ce fait, diminution de l'encombrement de la chaussée et des trottoirs ;
- e) Coût d'entretien réduit.

(1) Dans le cas où l'emploi de canalisations souterraines est indispensable, le prix de revient est considérablement augmenté.

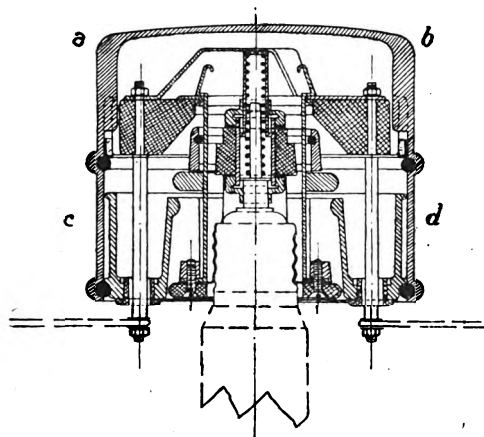
Inconvénients :

- a) Nécessité d'utiliser des fils aériens comme supports des foyers et pour leur alimentation ;
- b) Difficultés pour l'entretien, le nettoyage et le remplacement des lampes ;

# CONNECTEUR " M A M "

POUR LAMPES A INCANDESCENCE

*ELEVATION COUPE*



*PLAN*

$\frac{1}{2}$  COUPE *ab*.

$\frac{1}{2}$  COUPE *cd*

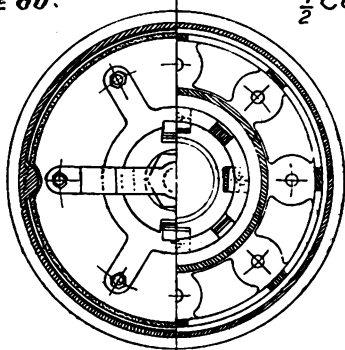


Fig. 2.

- c) Balancement de la lanterne sous l'action du vent ;
- d) Danger de chute des lampes ;
- e) Difficulté d'alignement des points lumineux.

Il y a lieu de noter que la plupart de ces inconvénients, particu-

lièrement ceux indiqués aux alinéas *c*, *d* et *e*, ont pu être évités à l'aide d'une construction appropriée, si bien que l'objection la plus forte que l'on puisse faire actuellement à ce mode de suspension réside surtout, comme nous l'indiquons ci-dessous pour Paris, dans des considérations d'esthétique.

Par ailleurs, il faut tenir compte que, dans certains cas, la suspension axiale s'impose presque obligatoirement pour l'éclairage des routes reliant les grandes agglomérations, particulièrement lorsque les voies à éclairer sont très larges et lorsque l'intensité de la circulation ne permet pas d'installer des refuges, ou bien encore lorsque

#### SUSPENSION AXIALE SANS TREUIL MODELE SAUNIER - DUVAL

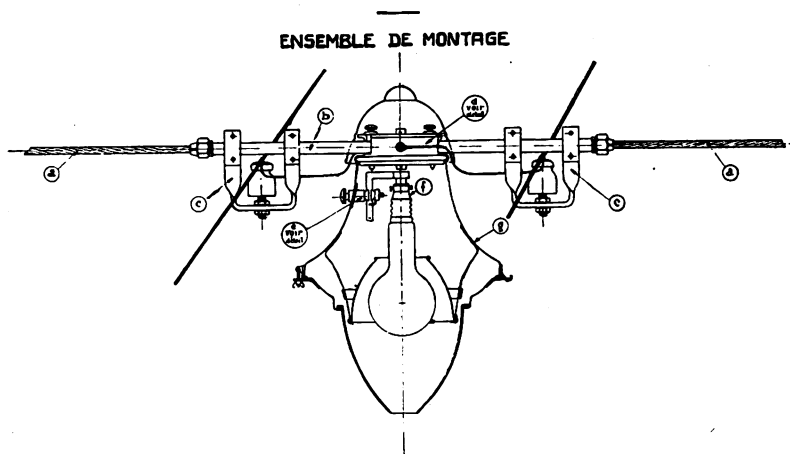


Fig. 3.

les trottoirs ne permettent pas l'installation des candélabres et aussi lorsque les rails des tramways sont installés sur un accotement.

Les dispositifs avec treuils permettant la descente de l'appareil sont lourds et d'un fonctionnement souvent défectueux.

Ils sont de moins en moins appréciés et on leur préfère les appareils fixes <sup>(1)</sup> du type décrit ci-dessous, qui sont beaucoup plus légers et plus élégants.

Avec ces appareils, dont un grand nombre a été installé en 1928, le remplacement des lampes se fait au moyen de grandes échelles portées en général sur voitures automobiles ou sur chariots spéciaux.

(1) A l'étranger il n'est plus fait emploi de treuil et dans beaucoup de cas on a enlevé ceux qui avaient été installés.

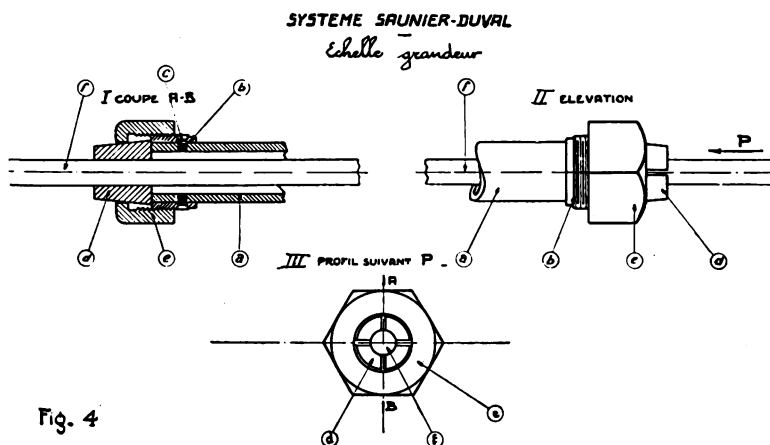
La Compagnie Provençale vient de terminer la mise au point d'un connecteur (fig. 1 et 2) permettant du sol, à l'aide d'une simple perche, le remplacement des ampoules hors d'usage.

Cet appareil supprime l'emploi des voitures échelles ou des dispositifs de descente de l'habillage par treuil.

B) *Suspensions axiales spéciales sans treuil avec colliers spéciaux* : Parmi les nombreux systèmes adoptés nous décrirons les deux suivants :

- a) dispositif adopté par les Etablissements Saunier-Duval ;
- b) dispositif adopté par la Compagnie Provençale d'Entreprises.

#### FIXATION DU TUBE PAR SERRAGE SUR LE CÂBLE DE SUSPENSION



a) *Dispositif adopté par la Maison Saunier-Duval.* — Ce matériel comprend : (voir fig. 3, 4, 5 et 6)

- 2 ferrures d'ancrage (non figurées),
- 1 câble de suspension,
- 1 tube support avec ses pièces de blocage sur le câble de suspension,
- 2 ferrures à colliers avec isolateurs-soutiens de ligne,
- 1 collier aluminium porte-lanterne,
- 1 support de douille avec dispositif permettant le réglage du point lumineux,
- 1 douille,
- 1 lanterne avec réflecteur de globe.

Nous allons décrire ci-dessous les pièces les plus importantes et celles qui présentent quelques particularités :

le tube support,

le collier aluminium porte-lanterne,

le support de douille, avec dispositif de réglage.

*Tube support* (voir fig. 4 - I, II, III). — Le tube « a » sur lequel est monté l'appareil d'éclairage est constitué par un tube fer

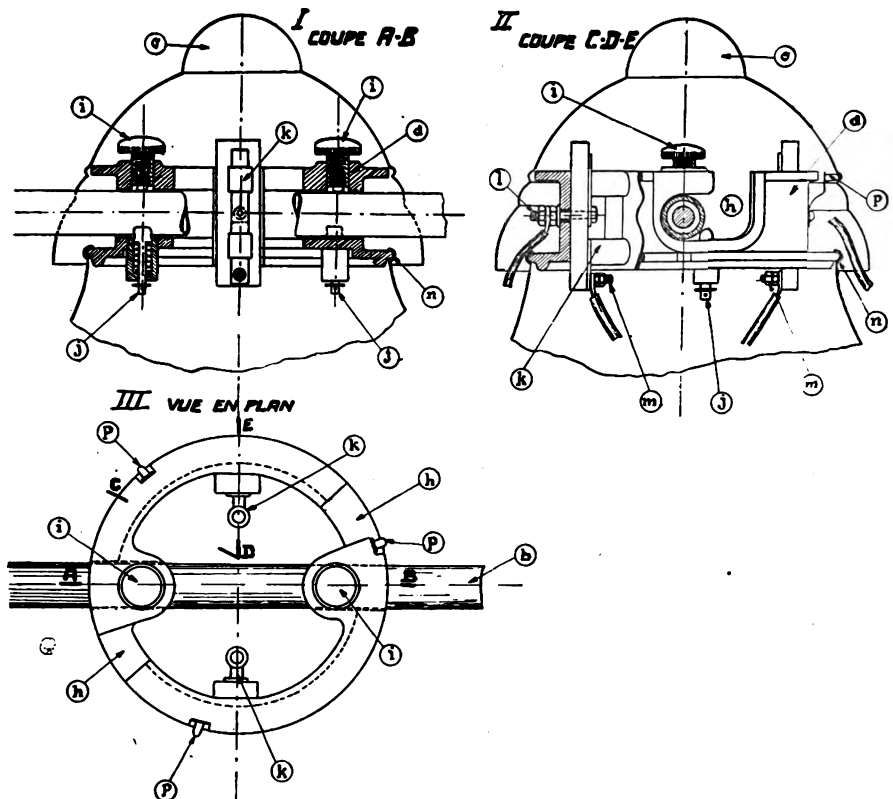


Fig. 5. — Collier Aluminium porte-lanterne.

15×21 mm. Une bague fileté « b » en laiton est montée à force sur ce tube, elle est également maintenue par 2 vis « c ».

Le tube « a » est maintenu sur le câble de suspension par un dispositif de serrage conique analogue au mandrin porte-forêt des petites machines à percer. Ce dispositif comprend 4 pièces coniques « d » formant mors et un écrou « e » permettant d'effectuer le serrage sur le câble.

*Collier aluminium porte-lanterne.* — Le collier en aluminium fondu (voir fig. 5, I, II, III) est d'une seule pièce. Il porte 2 évidements « h » diamétralement opposés dans lesquels le tube-support « b » vient s'accrocher par un montage à baïonnette. Le collier est maintenu sur le tube par les vis de blocage « i ».

Comme sécurité, au cas où les vis de blocage viendraient à se desserrer, les bonhommes d'arrêt (j) empêchent la chute de la lanterne. A l'intérieur du collier et dans un plan perpendiculaire à l'axe du tube-support, sont fixés les fusibles « k » avec socles isolants.

La fixation de ces fusibles est réalisée par des tiges filetées (l) munies d'écrous et isolées du collier par un canon en ébonite. Les câbles d'alimentation aboutissent à ces tiges filetées reliées électriquement à la partie supérieure du fusible.

La partie inférieure de ce fusible reliée à la borne « m » recevra les câbles de départ à la douille.

Le chapiteau « n » est serti par sa partie supérieure sur le collier « d » et les pièces formant l'appareil réflecteur (cercle, porteglobe, etc.) sont solidaires de ce chapiteau.

L'ensemble des pièces ci-dessus est coiffé par une calotte (o) à renflements. A l'intérieur du plus petit de ces renflements viennent buter 3 ergots (p) retenus par des ressorts de pression, ceux-ci étant fixés au collier (d). L'accrochage est automatique.

*Support de douille avec dispositif de réglage.* — Le support de douille (voir fig. 6 - I et II) se compose : 1° d'une équerre support (q). Le raccord fileté recevant la douille est serti à l'extrémité de la branche horizontale de l'équerre, tandis qu'à l'autre branche, les deux parties qui la composent laissent entre elles un intervalle donné par la largeur de la première branche et sont rivées sur elle ;

2° d'une pièce « r » fixée sur le chapiteau « n » ;

3° d'une rondelle « s » portant un trou taraudé recevant la vis « t » terminée par bouton moleté. La rondelle « s » est maintenue dans sa position par un ergot « v » aboutissant entre les deux parties de la branche de l'équerre « q » ;

4° entre la pièce « r » et la rondelle « s » se trouve une rotule « u » en 2 parties. Cette rotule est destinée à maintenir entre ses mâchoires l'équerre « q ».

L'avantage de ce dispositif consiste en ce que la vis (t) étant desserrée, la rotule (u) est libre, l'équerre et par suite la lampe peut monter, descendre, s'incliner.

Lorsque le point lumineux de la lampe se trouve exactement au foyer du réflecteur, par le serrage de la vis (t) la rotule (u) est bloquée et l'équerre « q » est fixe.

b) *Dispositif adopté par la Compagnie Provençale d'Entreprises.* — Ce matériel comprend (voir fig. 7, 8 et 9 - I, II, III, IV, V) 2 ferrures

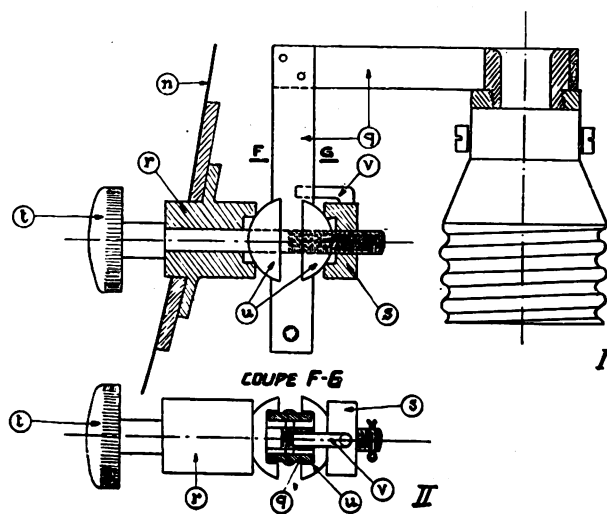


Fig. 6. — Douille avec son support.

d'ancrage (non figurées) ou deux potelets tubulaires sur toiture quand les hauteurs d'immeubles sont insuffisantes.

En cas d'absence totale d'immeuble, ou pour toutes autres causes d'impossibilité, il est fait usage, soit de pylones tubulaires en tube d'acier étiré sans soudure, à rétreints successifs équipés avec socle fonte, bagues dissimulant les rétreints et pomme de pin, encastrés dans un massif en béton de ciment établi suivant les règles de l'art, soit des pylônes en béton centrifugé ou des poteaux en bois. Dans certains cas spéciaux, il pourra être fait usage de consoles axiales ou de pylones de tramways munis de rallonges spéciales.

1 câble de suspension en acier demi dur soit de 6 mm de diamètre (un toron de 7 fils de 2 mm) et de 22 mm<sup>2</sup> de section correspondant à une charge de rupture de 1 980 kg, soit de 8 mm de diamètre (un



toron de 7 fils de 2 mm 7 et de 40 mm<sup>2</sup> de section correspondant à une charge de rupture de 3 600 kg.

La section du câble de suspension est choisie de façon à ce que, suivant les conditions particulières de travail, le coefficient de sécurité soit toujours au moins égal à 10.

#### SUSPENSION AXIALE SANS TREUIL MODELE C<sup>1</sup> PROVENÇALE D'ENTREPRISES

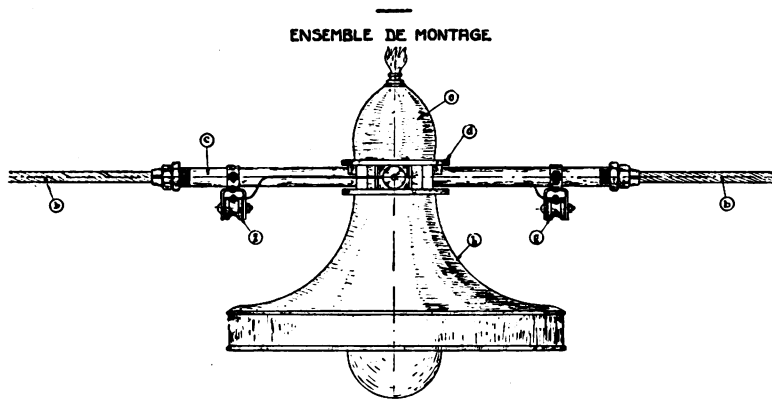


Fig. 7.

#### FIXATION DU TUBE PAR LE SERRAGE SUR LE CÂBLE DE SUSPENSION

##### SYSTEME C<sup>1</sup> PROVENÇALE

*Echelle grandeur*

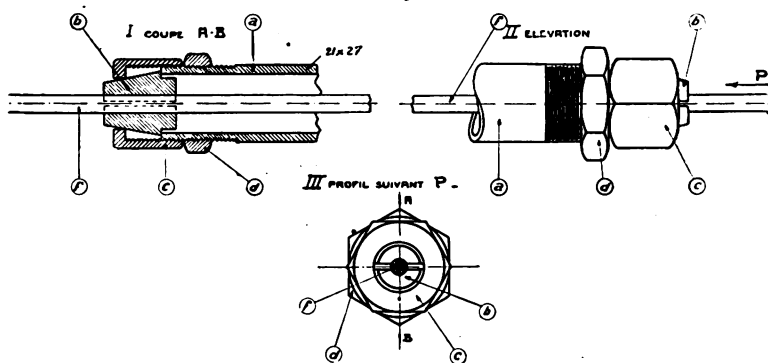
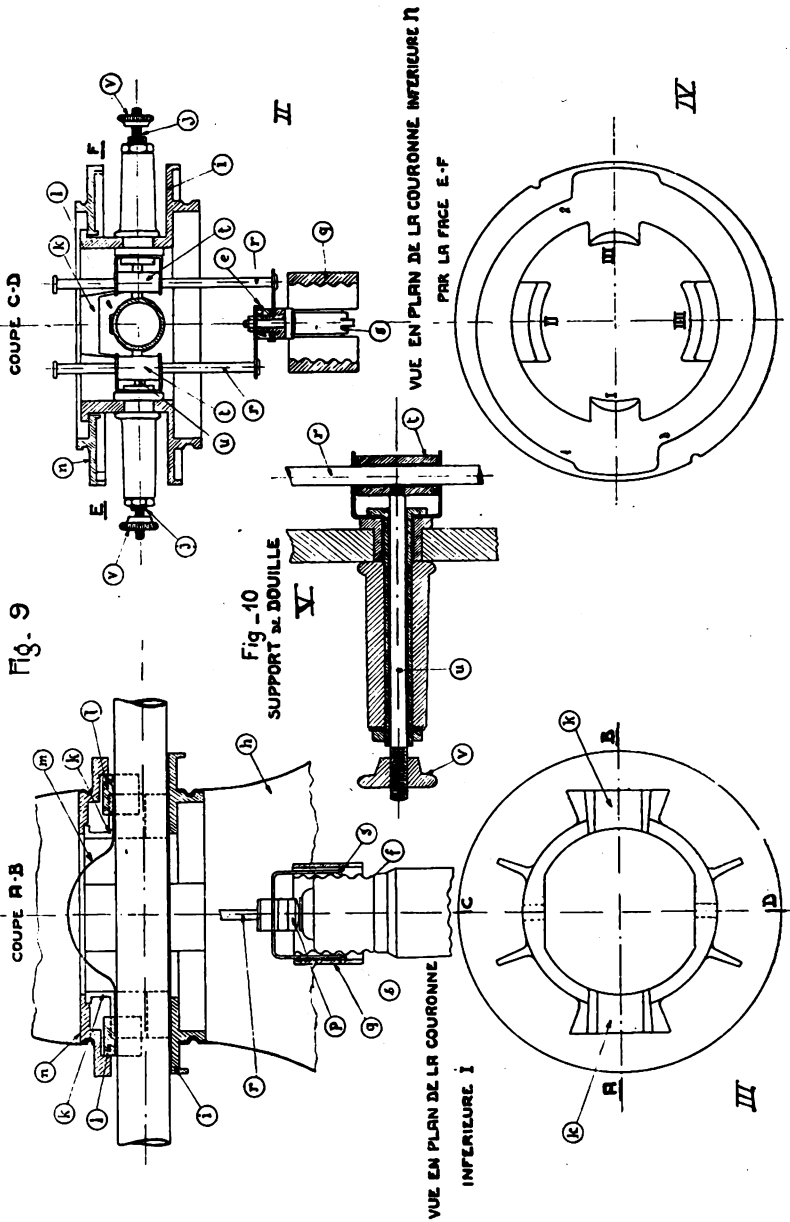


Fig. 8.

- 1 tube support avec ses pièces de blocage sur le câble de suspension,
- 1 collier M.A.M., porte-lanterne,
- 1 support de douille avec ses griffes empêchant le desserrage de la douille,

## COLLIER M.A.M. MONTE AVEC DOUILLE ET SUPPORT DE DOUILLE



1 douille,  
des poulies supports de ligne,  
1 lanterne avec réflecteur <sup>(1)</sup>.

A) Il y a lieu de noter que les pièces composant la suspension sont en nombre réduit et largement dimensionnées, que le métal employé est léger et inaltérable.

La construction même du collier permet une bonne étanchéité tout en assurant une ventilation énergétique.

Nous allons décrire ci-dessous les pièces les plus importantes et celles qui présentent quelques particularités :

le tube-support ;  
le collier M.A.M. ;  
la douille et son support.

*Tube-support* (fig. 8 - I, II, III). — Le tube « a » sur lequel est monté l'appareil d'éclairage est constitué par un tube fer 21 x 27 fileté à ses extrémités.

Le tube « a » est maintenu sur le câble de suspension par un dispositif de serrage conique analogue au mandrin porte-foret des petites machines à percer.

Ce dispositif comprend 2 pièces « b » en laiton formant mors et un écrou « c » permettant d'effectuer le serrage sur le câble. Un contre-écrou « d » bloquant tout le système évite tout desserrage.

*Collier M.A.M.* — Le collier (voir fig. 9, I, II, III, IV) Alpax <sup>(2)</sup> est composé de deux couronnes.

La couronne inférieure à ailette (i) porte le support de douille (e), les bornes d'arrivée de courant (j) et la lanterne.

Cette couronne se place sous le tube de suspension qui vient se loger dans deux échancrures (k) diamétralement opposées.

Ces échancrures sont entaillées à partir d'une certaine hauteur en forme de queue d'aronde servant de logement à deux coins (l) appropriés reliés par un petit ressort (m) à lames qui les maintient écartés.

La partie inférieure de ces deux coins est creusée en forme de demi-cylindre et vient reposer sur ce tube.

---

(1) Il y a lieu de noter que la suspension permet l'utilisation de tous les types de réflecteurs et diffuseurs actuellement sur le marché.

(2) L'Alpax est un alliage constitué par 8 pour 100 d'aluminium, 13 pour 100 de silicium et soumis à un affinage particulier.

Lorsque les coins sont introduits dans les échancrures, ils maintiennent la couronne inférieure sur le tube sans toutefois serrer celui-ci.

La couronne supérieure (n) qui porte le chapiteau (o) est munie de quatre tenons (I-II-III-IV) qui s'emboîtent dans les évidements ou rainures correspondantes de la couronne inférieure de façon à assurer un centrage et un guidage parfaits.

La rotation de deux dents spiroïdales (1, 2, 3 et 4) pousse les coins vers le centre, ce qui a pour effet de produire un serrage énergique des deux couronnes sur le tube.

Il y a lieu de remarquer que ce système ne comportant pas de filetage, le démontage sera plus facile même après plusieurs années de service.

La couronne inférieure porte également deux tiges horizontales de réglage. Ces tiges sont munies à leur extrémité de deux écrous servant de borne de prise de courant.

*Douille et support de douille* (fig. 10 - V). — L'alimentation et le réglage de la lampe sont assurés par une douille composée d'une chemise filetée coulissant au moyen de deux rainures sur un étrier terminé à sa partie inférieure par deux griffes.

Cet étrier est terminé à sa partie supérieure par un bouton dont il est rigoureusement isolé. L'alimentation de la lampe se fait :

1° par un plot central (p) dont la tête inférieure, en contact avec le culot de la lampe porte un évidement garni de métal mou. Ce plot est relié à une languette solidaire d'une tige de réglage ;

2° par la chemise filetée (q) reliée à une deuxième languette reliée également à l'une des tiges de réglage (r).

Quand la lampe est vissée à fond, il se produit une légère flexion de l'étrier et deux griffes (s) viennent mordre sur le culot de la lampe, l'empêchant ainsi de se desserrer.

Le réglage du point lumineux s'obtient :

1° Verticalement, en descendant les deux tiges de réglage (r) qui coulisent dans deux tubes (t) solidaires de deux tiges horizontales (u) passant dans deux isolateurs de traversées en porcelaine.

Deux écrous (v) permettent, par le déplacement de deux tiges horizontales, de bloquer les deux tiges de réglage et par suite le point lumineux dans la position voulue.

2° Horizontalement, par le déplacement de l'habillage sur le tube.



Fig. 11.

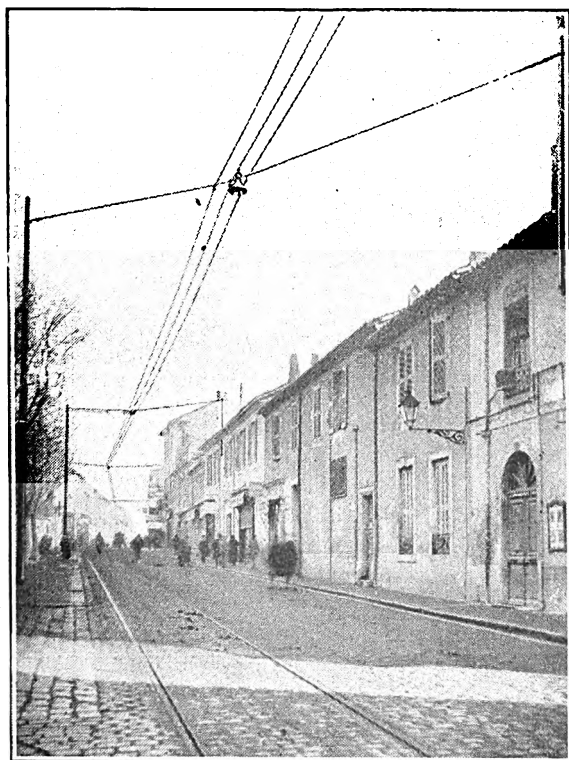


Fig. 12.

### B) Applications du collier M.A.M.

(fig. 11, 12, 13, 14, 15)

La fig. 11 représente un modèle de candélabre en acier tubulaire à double foyers lumineux, la hauteur de ces foyers au-dessus du sol étant de 9,50 m, muni de deux consoles ayant 6 m de porte-à-faux et aux extrémités desquelles se trouvent des lampes de 300 à 500 W.

Les figures 12, 13, 14 et 15 représentant quatre types différents de montages, soit sur poteau et potelet, sur poteau et façade d'immeuble ou sur potelet et façade d'immeuble.

### C) Candélabres

En même temps que des candélabres en fonte, on a monté <sup>(1)</sup> en 1928 un assez grand nombre de candélabres en ciment armé ou en béton centrifugé dont certains sont polis et revêtus, à l'aide de produits spéciaux, de couleurs variées qui leur donnent l'aspect du marbre <sup>(2)</sup>.

Signalons également l'installation à Paris de candélabres à ornement de fonte avec armature d'acier qui présentent sur les anciens candélabres en fonte le grand avantage de ne pas se briser sous le choc des véhicules et qui par suite sont beaucoup moins dangereux en cas d'accident <sup>(3)</sup>.

### D) Consoles .

Les consoles scellées sur les maisons où fixées sur poteaux, continuent à être largement employées pour supporter les appareils de très faible intensité.

On a également installé en certains points de Paris, quelques consoles murales supportant de gros appareils (fig. 16) avec lampes de 500 W, là, où (faute de place) l'implantation de candélabres n'était pas possible.

Enfin, les installations avec montage de gros appareils (verrière Holographane, lampes de 500 W) sur consoles fixées sur poteaux de trolley, installations qui sont très satisfaisantes aussi bien du point de vue esthétique que du point de vue prix et éclairagements réalisés, ont con-

---

(1) Sauf à Paris.

(2) La Société Française des poteaux électriques Forclum fabrique un certain nombre de types dont l'aspect est très esthétique.

(3) Il y a eu à Paris en 1928, un candélabre détérioré pour 22 appareils installés.

tinué, surtout à Paris, à progresser normalement au cours de l'année 1928.

#### 6° APPAREILS

Les appareils ont assez peu évolué au cours de l'année 1928.

On peut noter, cependant, une légère tendance, surtout pour les nouveaux appareils à suspension axiale, à la suppression des globes

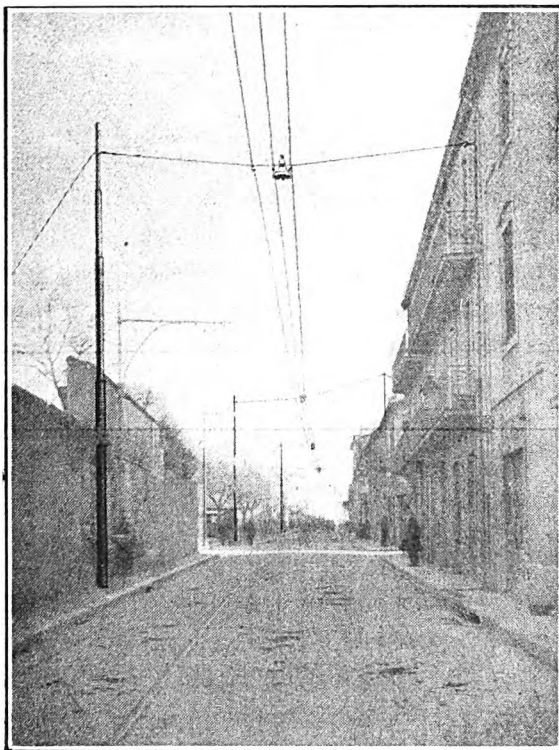


Fig. 13.

ou au remplacement des globes réfracteurs par des verreries minces en verre clair ou légèrement opale. Ceci a l'avantage de réduire le poids des appareils et aussi d'améliorer leur rendement lumineux.

En ce qui concerne l'éblouissement et la répartition du flux lumineux, les inconvénients qui pourraient résulter de la suppression des globes réfracteurs sont beaucoup moins importants avec les hauteurs assez élevées qui sont actuellement fréquemment adoptées pour les

foyers lumineux, qu'ils ne l'auraient été avec les hauteurs plus faibles dont on se contentait il y a quelques années.

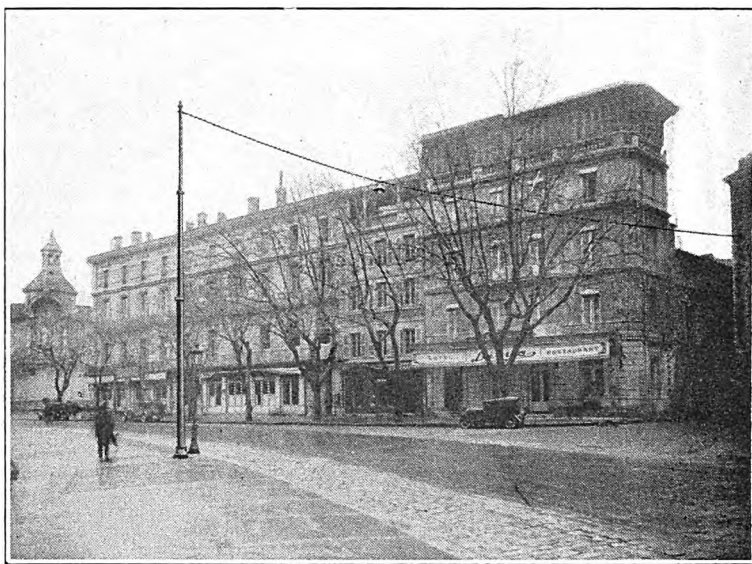


Fig. 14.

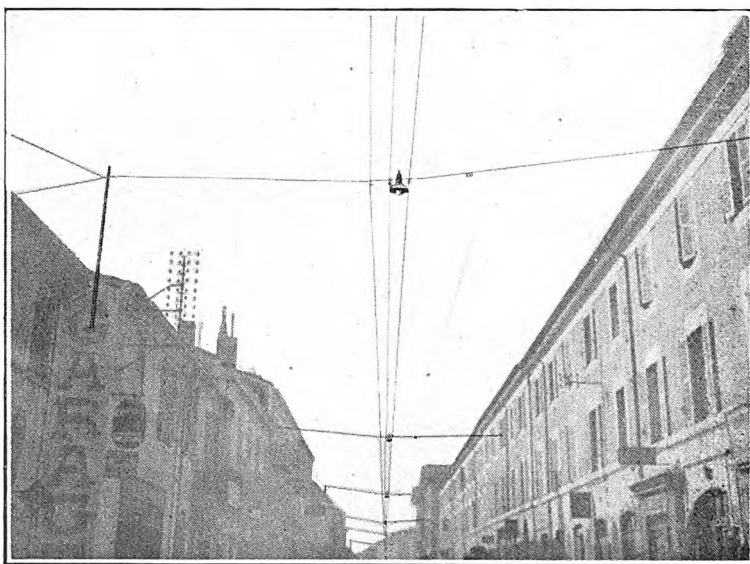


Fig. 15.

En particulier, dans la plupart des applications réalisées par la Compagnie Provençale d'Entreprises, chaque appareil est équipé d'un ré-



flecteur émaillé blanc à bol de diffusion rationnel et couronne anti-éblouissante.

## CROSSE APPLIQUE

*Modèle Durenne*

- Echelle :  $\frac{1}{10}$  -

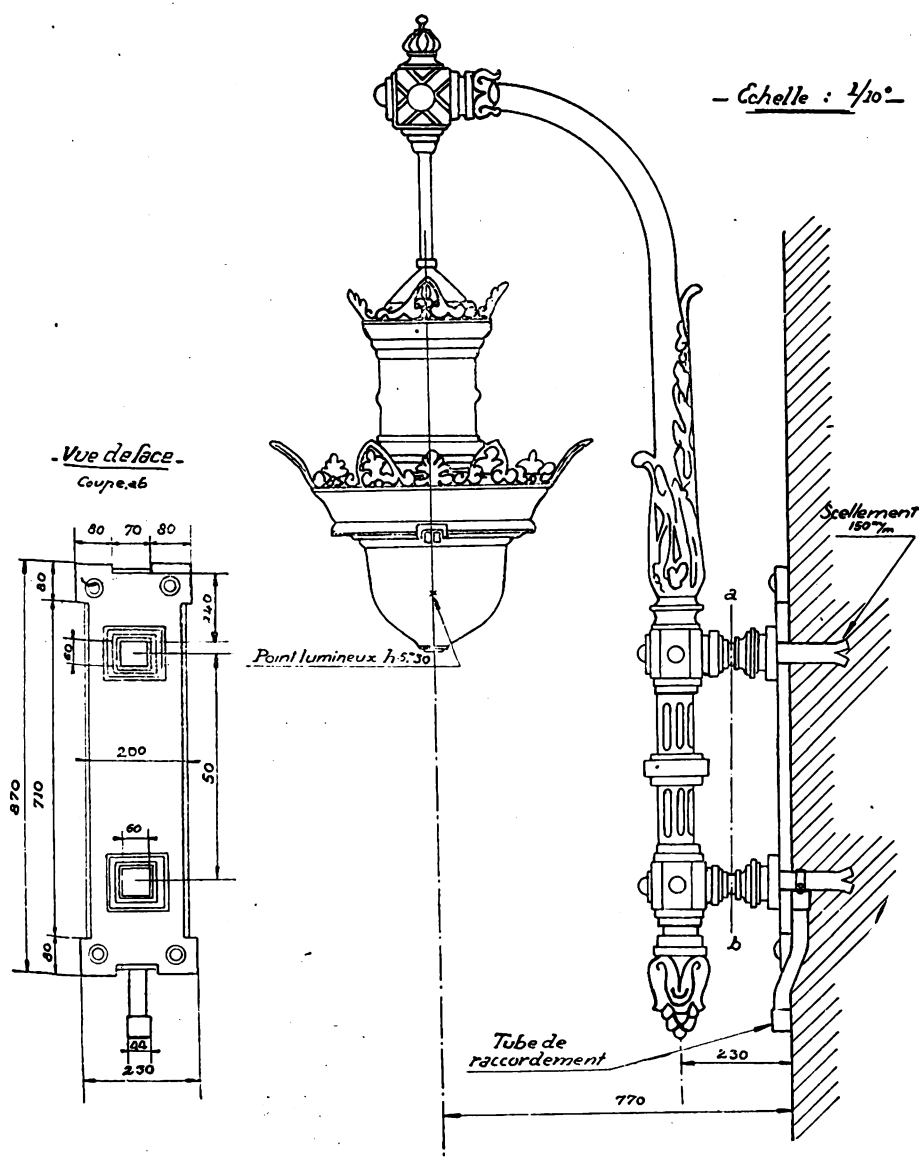


Fig. 16.

Le diagramme (fig. 17 et 17 bis) donne la courbe photométrique

individuelle du réflecteur ainsi que la courbe de répartition lumineuse le long de la voie à éclairer.

L'examen de ce diagramme montre que :

| Pour les lampes de puissances en watts : | 200   | 300   | 500   |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Un éclairage en lux maximum de.....      | 5,1   | 7,2   | 12,00 |
| » » minimum de.....                      | 0,86  | 1,2   | 2,00  |
| » » moyen de.....                        | 2,30  | 3,2   | 5,30  |
| Un coefficient d'uniformité de :.....    | 0,166 | 0,166 | 0,166 |

#### 7° ALIMENTATION DES FOYERS

A l'exception d'un certain nombre d'anciens circuits de lampes à arc comportant plusieurs lampes montées en série, les foyers d'éclairage public sont partout alimentés en dérivation.

On a envisagé, pour des installations actuellement à l'étude, l'alimentation en série avec transformateurs spéciaux auto-régulateurs à bobine pendante, mais ce montage, qui donne de si bons résultats aux Etats-Unis et en Italie n'a pas encore été appliqué en France.

A Paris et dans la plupart des grandes villes l'alimentation est faite par câbles souterrains, dans les villes de moindre importance on préfère en général, pour des raisons d'économie, l'alimentation par fil aérien.

Dans ce dernier cas, la distribution est fréquemment assurée <sup>(1)</sup> par ligne axiale à deux, trois ou quatre conducteurs nus en cuivre électrolytique demi-dur. En général, ces conducteurs sont tendus en fixant un taux maximum de travail du cuivre de 8 kg/mm<sup>2</sup> dans la plus défavorable des deux combinaisons de charges accidentelles données par l'article VI de l'arrêté ministériel du 30 avril 1927.

Les foyers sont branchés, soit sur une canalisation spéciale d'éclairage public, soit sur le réseau qui dessert les abonnés.

Une solution mixte, quelquefois adoptée, consiste à monter les appareils entre un fil de réseau et un fil spécial pour l'éclairage public.

L'alimentation des foyers par réseau moyenne tension (3 000 V en général) avec transformateurs individuels enterrés, semble devoir prendre dans la suite une certaine importance, en raison des économies qu'elle permet de réaliser.

---

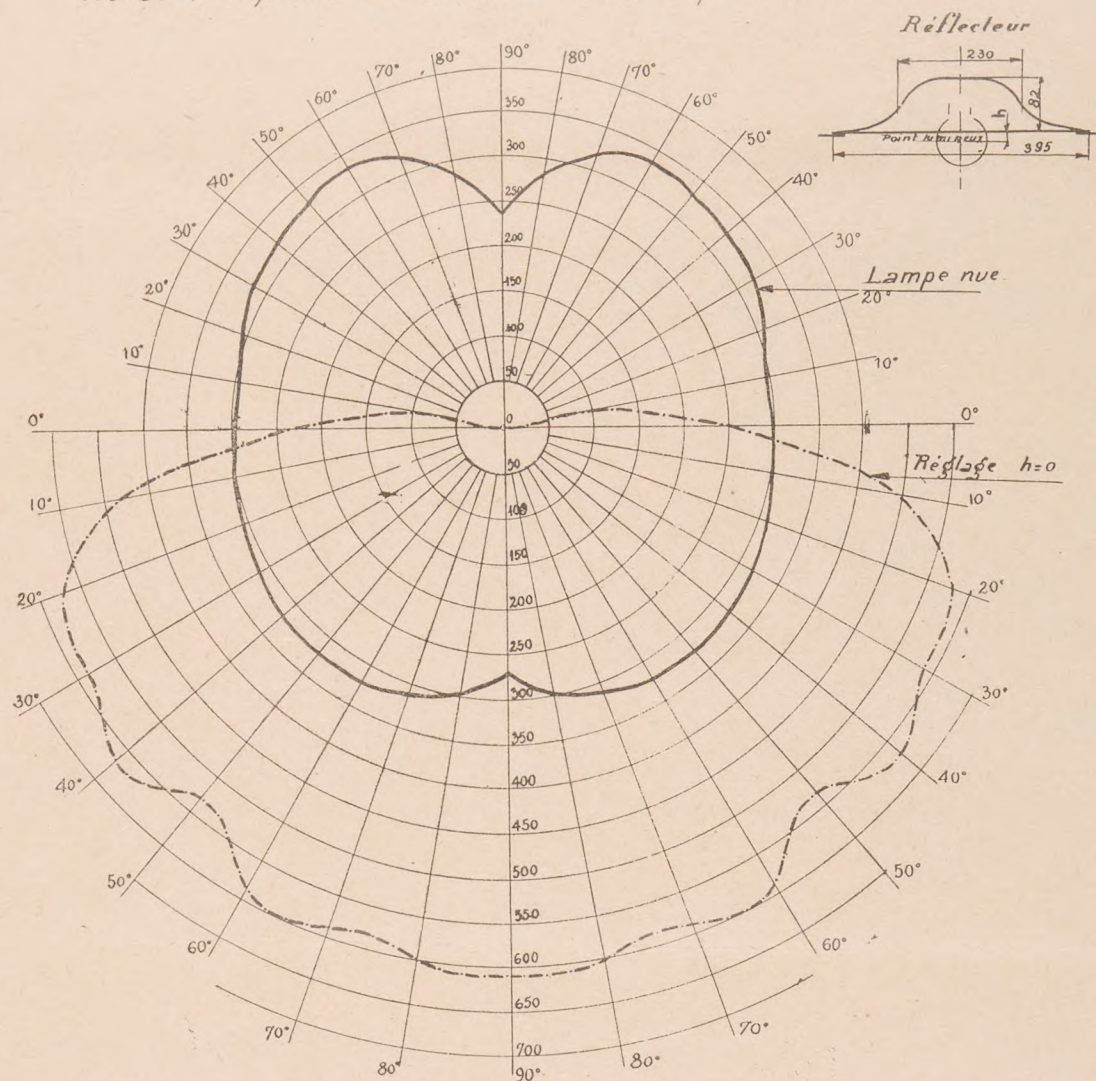
(1) Installations de la Compagnie Provençale d'Entreprises.



# Appareil en tôle émaillée de la S<sup>te</sup> Provençale

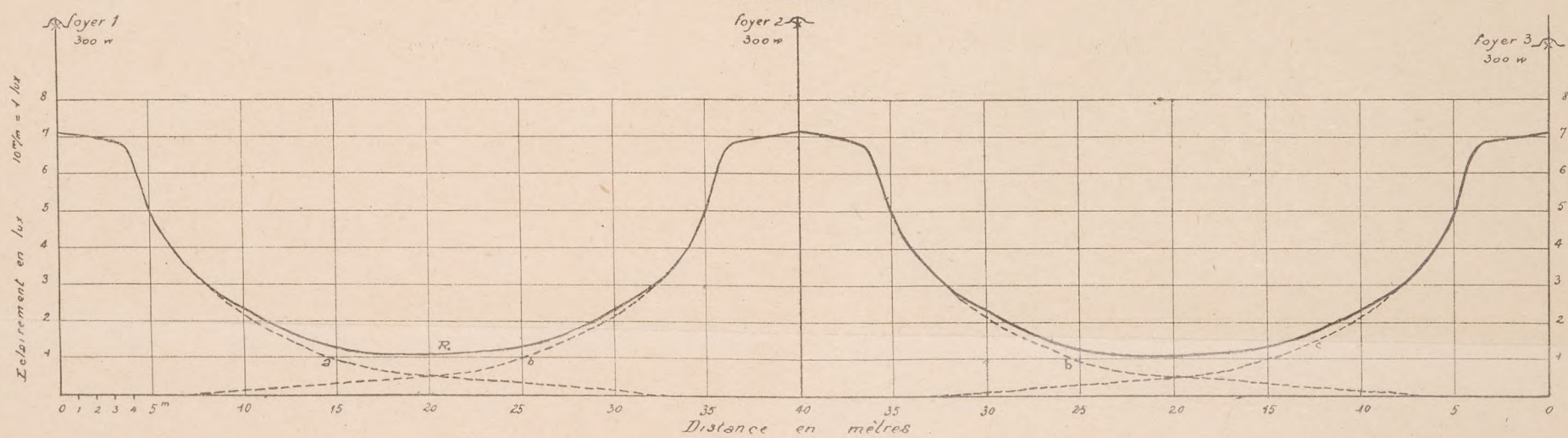
Lampe à filament en W de 300<sup>w</sup> - 300<sup>w</sup>.8 à 110<sup>v</sup>ols

Courbe de répartition lumineuse dans un plan vertical



Eclairage public par lanterne MAM C.P.E B<sup>n</sup> S G D G  
avec Réflecteur émail blanc à bol de diffusion rationnel et couronne anti éblouissante

hauteur du point lumineux 9<sup>m</sup> distance entre 2 foyers 40<sup>m</sup>



a courbe du foyer 1  
b courbe du foyer 2  
c courbe du foyer 3  
Eclairage maximum 7.2  
" minimum 4.2  
" moyen 3.2  
R, courbe résultant de l'action des 3 foyers  
Coefficient d'uniformité 0.166

Echelle : 5<sup>m</sup>/m par Mètre

Fig. 17 et 17 bis.







*Schéma de principe pour les installations d'éclairage public comportant une canalisation  
spéciale pour l'alimentation des candélabres*

*Commande par horloges et contacteurs*

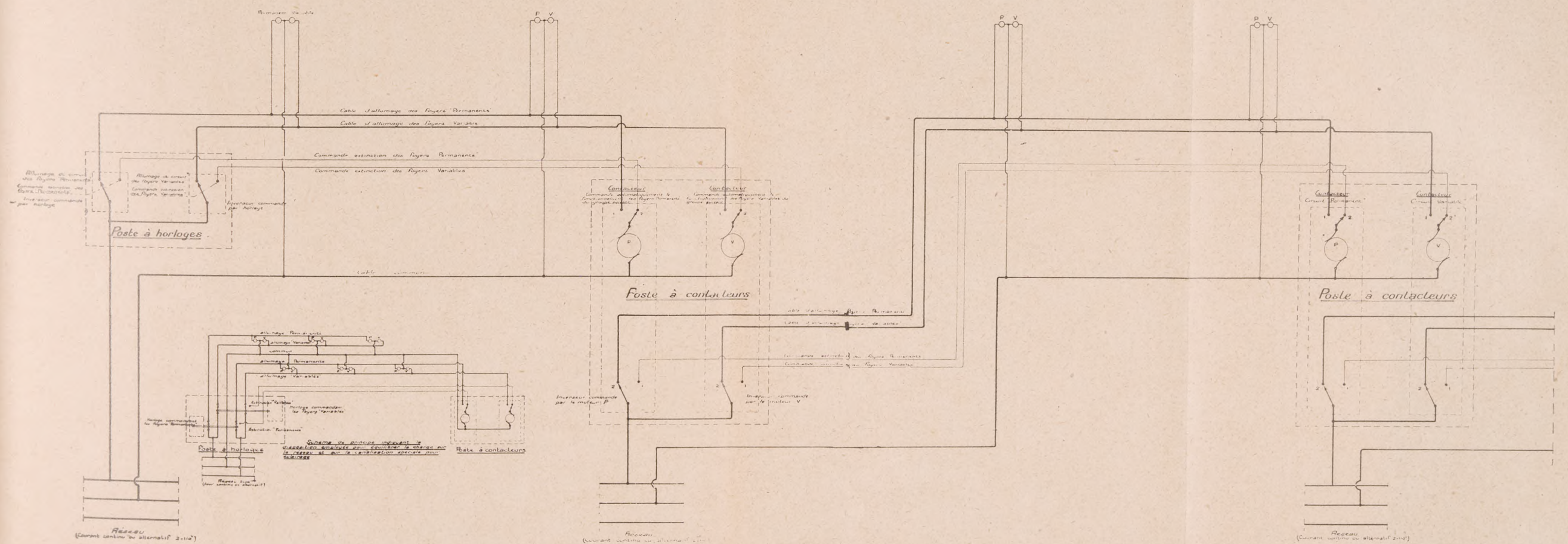


Fig. 18.





L'emploi de ces appareils sur les réseaux qui desservent également les abonnés, ne s'est pas encore beaucoup développé, car il y a quelques perfectionnements à apporter aux types de transformateurs enterrés actuellement existants, en particulier dans la disposition des fusibles de protection qui doivent être noyés dans la masse.

Un système d'alimentation assez particulier et qui de ce fait mérite une mention spéciale, est celui qui a été réalisé à Nîmes pendant l'année 1928.

On a voulu, dans cette Ville, éviter les extinctions des foyers d'éclairage public pendant les interruptions qui peuvent se produire sur le réseau d'alimentation desservant Nîmes.

On a, dans ce but, profité du fait qu'une petite partie du centre de la Ville est alimentée en courant continu à  $2 \times 125$  V par une sous-station recevant du courant triphasé à 5 000 V et munie d'une batterie d'accumulateurs de secours de 5 800 Ah sous une tension de 250 V.

Au lieu de brancher les différents circuits d'éclairage public sur les différents ponts de la canalisation triphasée 15 000/2  $\times$  115 V qui distribue l'énergie en Ville, on a réalisé un réseau spécial d'éclairage public comportant quatre fils 250/450 V alimentés en un seul point par un transformateur de 120 kVA 5 000/250/430 V monté dans la sous-station existante au centre de la Ville.

En cas de panne du réseau général à haute tension, des contacteurs automatiques branchent instantanément le réseau d'éclairage public sur la grosse batterie d'accumulateurs de secours. Les trois ponts du réseau d'allumage restent ainsi connectés sous 250 V et, si l'éclairage est moins brillant que pendant le fonctionnement normal, l'extinction complète n'en est pas moins radicalement évitée.

Lorsque le courant à haute tension est rétabli, les contacteurs automatiques assurent la manœuvre inverse.

#### 8° COMMANDE DES FOYERS

La commande d'allumage et d'extinction au moyen d'interrupteurs manœuvrés à la main, est de moins en moins employée et n'est utilisée que comme secours, lorsque les appareils automatiques viennent à se déranger.

Dans la commande automatique à distance, deux cas principaux sont à envisager.

A. — *Commande des foyers branchés sur une canalisation spéciale d'éclairage public*

La commande des circuits spéciaux d'éclairage public est faite surtout par des interrupteurs automatiques à horloges avec ou sans ca-

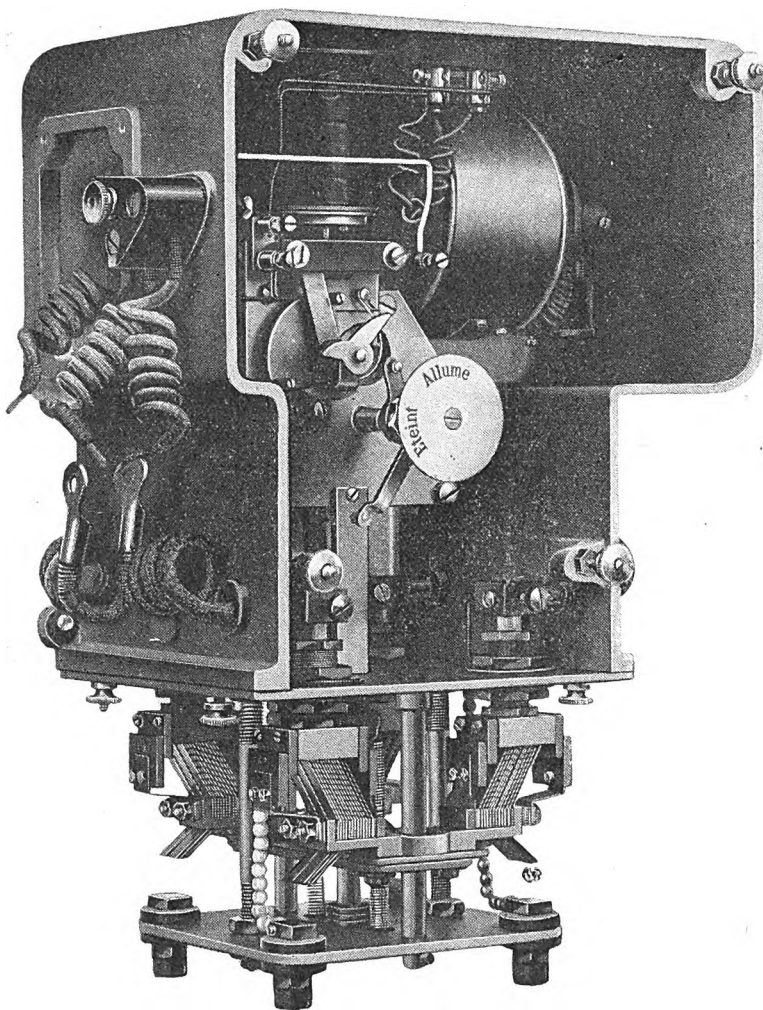


Fig. 19.

drans astronomiques. Ces derniers sont de plus en plus répandus en France et leur fonctionnement est en général satisfaisant.

A Paris (fig. 18) plusieurs circuits sont réunis en cascade et commandés par une même horloge, la continuité de la commande est



assurée par des appareils spéciaux appelés contacteurs que nous allons décrire sommairement ci-dessous.

### Schéma de principe .

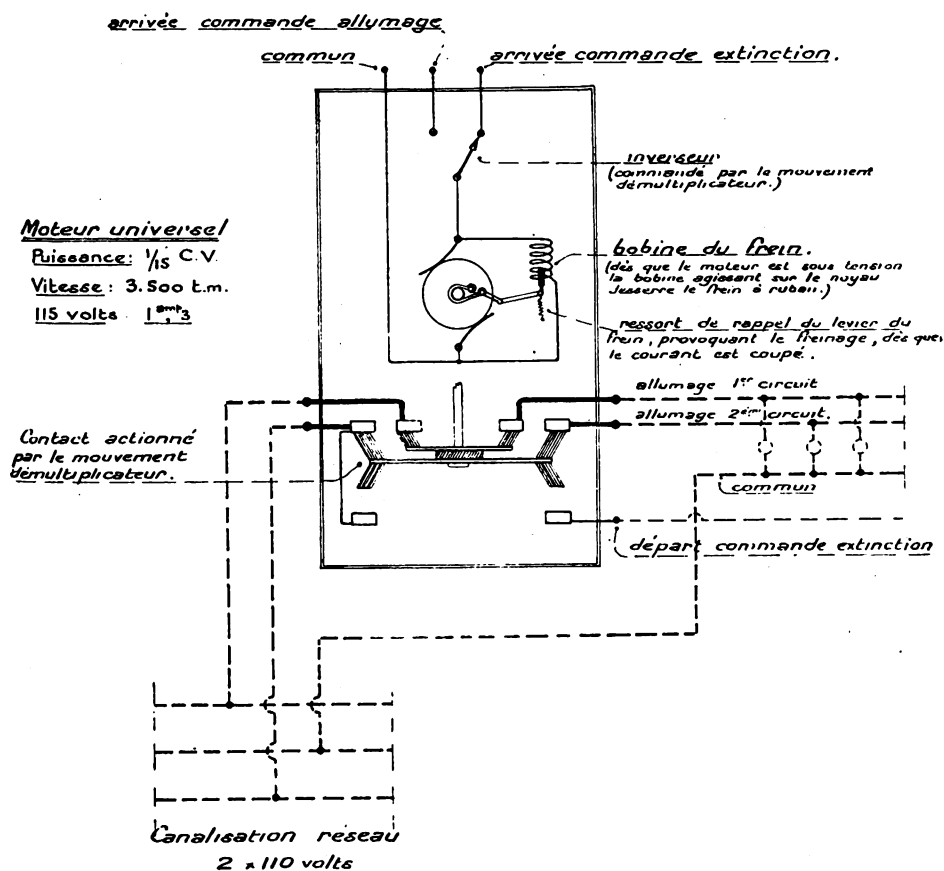


Fig. 20. — Contacteur.

**Contacteur (fig. 19).** — Cet appareil représenté schématiquement par le dessin ci-joint (fig. 20) comprend essentiellement un servo-moteur commandant, d'une part un interrupteur, d'autre part, un inverseur.

Au contacteur aboutissent 3 fils de commande :

a) le fil commun du circuit d'éclairage public de commande ;

- b) l'un des câbles d'alimentation des lampes de ce circuit ;
- c) un câble spécial pour la commande d'extinction et qui est mis sous tension lorsque les lampes du circuit précédent sont éteintes (ce circuit est commandé par un interrupteur identique à celui qui est représenté sur le schéma du contacteur).

Lorsque le câble de commande d'allumage est mis sous tension, l'inverseur étant placé sur le plot auquel aboutit ce câble le moteur fonctionne et, par l'intermédiaire d'un dispositif de multiplication et d'une bielle, établit les contacts principaux de l'interrupteur, coupant le circuit de commande d'extinction du contacteur. Ce mouvement bande deux ressorts solidaires de la bielle. Cette manœuvre terminée, l'inverseur bascule et le moteur s'arrête. Un frein énergique réalise un arrêt brusque dans une position invariable. L'inverseur se trouvant sur le plot de commande extinction, lorsque ce câble est mis sous tension, le moteur fonctionne à nouveau, la bielle se décroche et, sous l'action des ressorts, l'interrupteur reprend sa position primitive, coupant brusquement le circuit des lampes et rétablissant le courant sur le câble de commande d'extinction du contacteur suivant.

En fin de manœuvre, l'inverseur revient sur le plot de commande allumage qui à ce moment n'est pas sous tension et le mouvement s'arrête.

#### B) *Commande des foyers alimentés directement par le réseau de distribution*

Dans un grand nombre de cas les foyers sont commandés par de petits interrupteurs individuels.

A Paris (fig. 21) l'allumage et l'extinction des appareils de cette catégorie sont réalisés au moyen de télérupteurs (type Proust, type Brillié) placés dans chaque candélabre et actionnés par un courant d'intensité très faible transmis par une ligne spéciale de commande placée généralement en égout et alimentée sous la tension de 50 V.

En outre, on utilise un dispositif spécial, réalisé par la Compagnie des Compteurs, pour la commande des lampes à deux filaments qui remplacent les lampes à arc montées en série (fig. 22).

Nous allons décrire ci-dessous le fonctionnement de ces relais.



# Schéma de l'installation pour la commande des candélabres par télérupteurs.

## Montage en dérivation.

Courant continu ou courant alternatif.

## Montage en série.

Courant continu ou courant alternatif redressé.

## Candélabre de commande

Ce schéma représente l'équipement d'un candélabre de commande pour émission de courant continu. Le courant alternatif redressé est obtenu au moyen d'un redresseur.

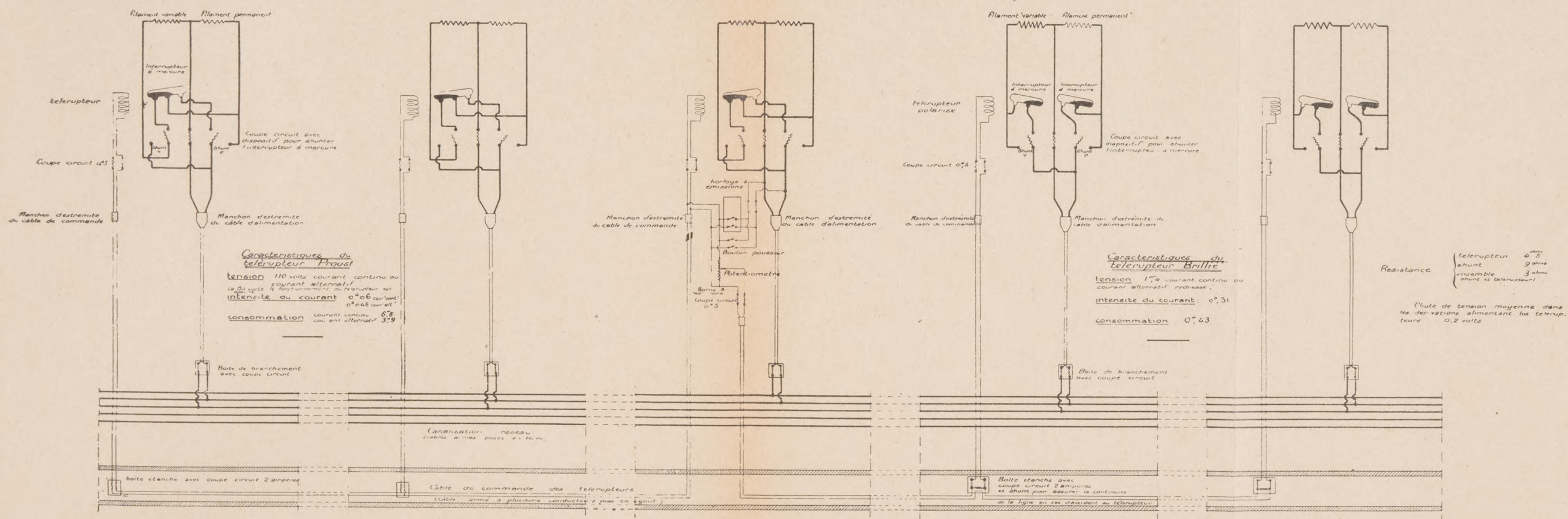


Fig. 21.

Laboratoire du Service de l'Éclairage Public  
 le 4 Janvier 1928.





# Schéma de principe.

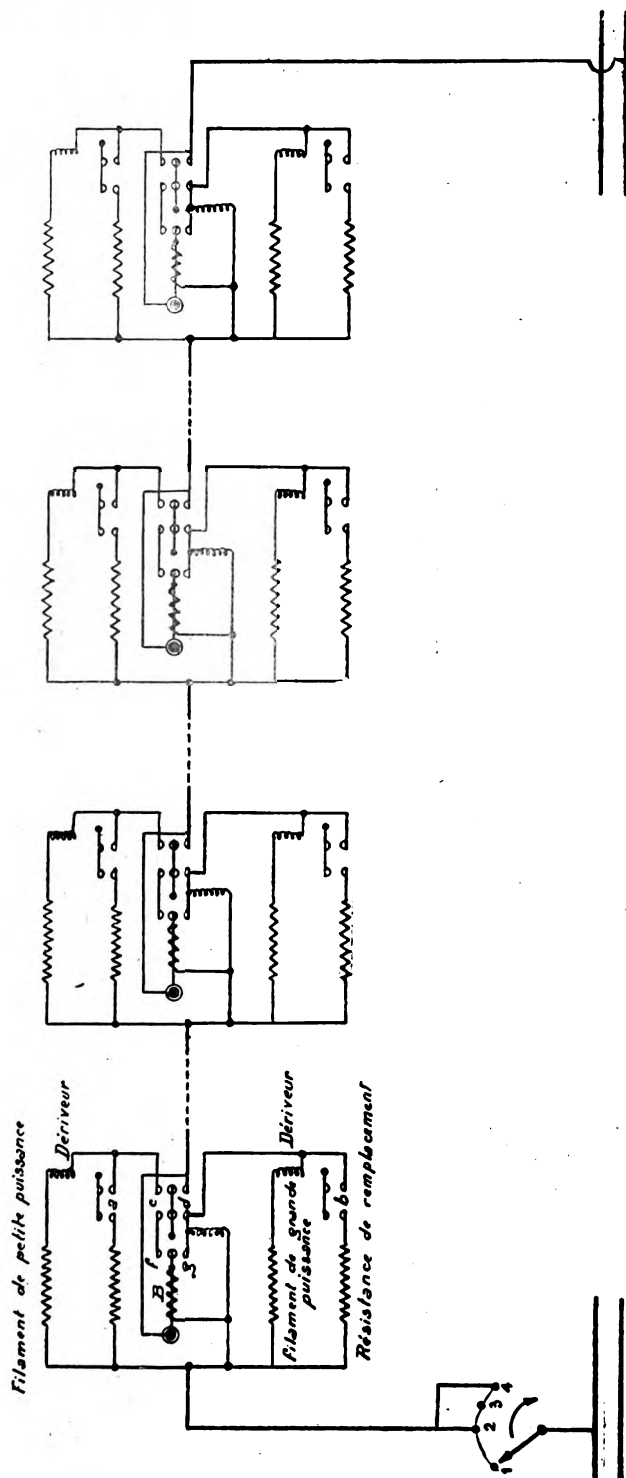


Fig. 22. — Montage en série des lampes à 2 filaments.

*Télerupteur type Proust (fig. 23).*

Le télerupteur Proust est un appareil commandé électriquement et à fonctionnement mécanique.

Cet appareil comprend un interrupteur à mercure à 3 voies susceptible de prendre 3 positions distinctes, correspondant à :

- 1° l'extinction des deux filaments ;
- 2° l'allumage simultané des deux filaments ;
- 3° l'extinction du filament variable, le filament permanent restant allumé (1).

Le basculement de la tige métallique sur laquelle est fixée l'ampoule

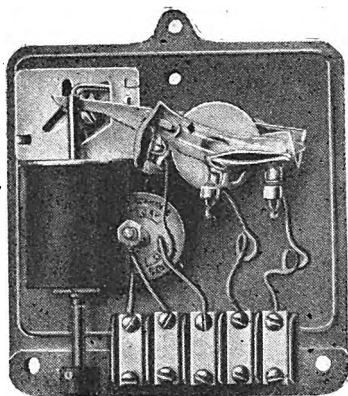


Fig. 23.

est obtenu par l'action du doigt qui termine le noyau mobile d'une bobine parcourue par les émissions de courant.

Pendant chaque émission de courant, le noyau est sollicité vers le haut, il retombe ensuite sous l'action de la pesanteur.

Afin d'obtenir des inclinaisons différentes du tube à mercure, le doigt qui le commande ne reprend pas après chaque émission la même position ; il est, à cet effet, guidé par deux plaquettes découpées avec profil spécial, l'une fixe, l'autre pouvant osciller. Ce mécanisme assure trois positions de repos différentes pour le doigt, positions que celui-ci occupe successivement.

---

(1) On utilise aussi des télerupteurs Proust d'un type semblable mais permettant l'emploi de lampes à marche séparée des deux filaments.

Les télérupteurs Proust sont montés en dérivation sur une ligne alimentée par une batterie d'accumulateurs de 50 V ou par un transformateur 110/50 avec point milieu à la terre.

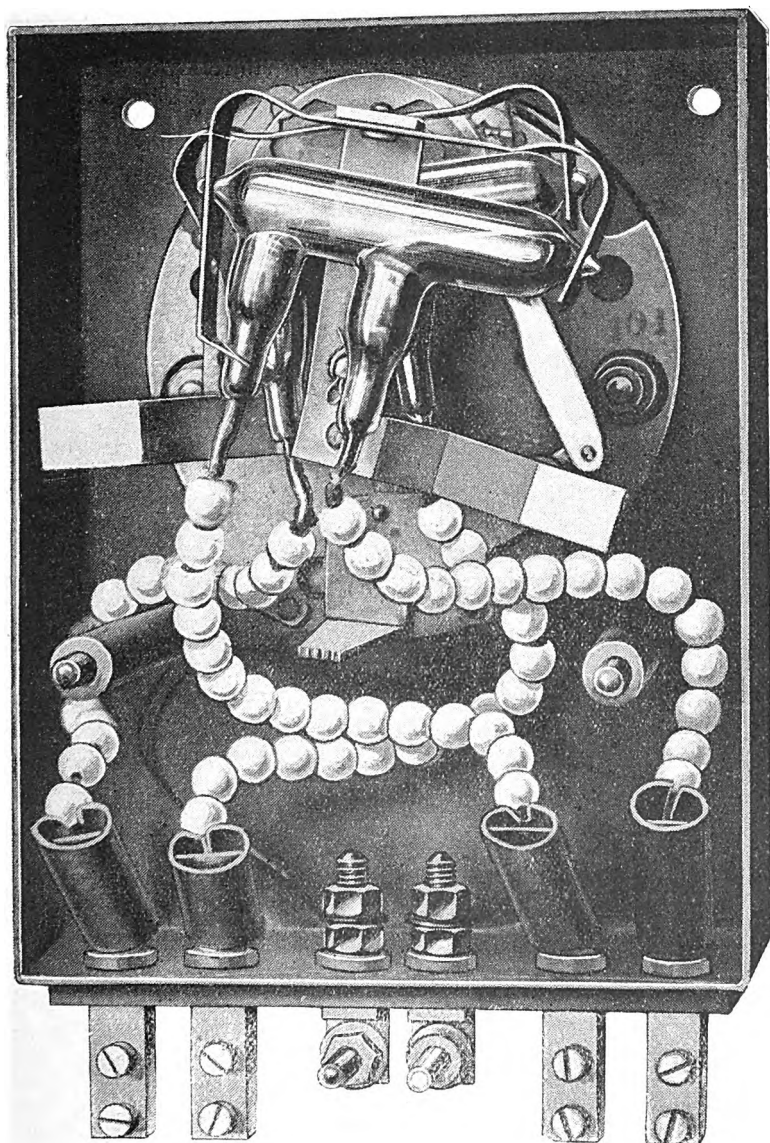


Fig. 24.

Les émissions de courant qui provoquent les manœuvres et dont la durée est très courte (quelques secondes) sont produites automatiquement par un interrupteur à horloge.

Les caractéristiques électriques du télérupteur Proust sont les suivantes :

|                                 |                         |       |
|---------------------------------|-------------------------|-------|
| Tension en volts.....           |                         | 50    |
| Intensité du courant en ampères | courant continu.....    | 0,173 |
|                                 | courant alternatif..... | 0,132 |
| Consommation en watts           | courant continu.....    | 8,56  |
|                                 | courant alternatif..... | 8,25  |

*Télérupteur type Brillié (fig. 24).*

Le télérupteur Brillié est, comme le télérupteur Proust, un appareil commandé électriquement et à fonctionnement mécanique.

Cet appareil, qui ne fonctionne qu'avec du courant continu ou du courant alternatif redressé, comprend essentiellement un aimant permanent entre les pôles duquel, peut osciller une petite bobine qui est parcourue par le courant de commande.

Un cliquet, solidaire de cette bobine, agit sur une roue dentée. A chaque émission de courant, le pivotement de la bobine fait, au moyen du cliquet, avancer d'une dent la roue dentée.

Une came, de profil convenable et solidaire de cette roue dentée, produit, par l'intermédiaire de deux petits leviers, le basculement de deux interrupteurs à mercure qui commandent, l'un le filament permanent, l'autre le filament variable.

Les télérupteurs Brillié sont montés en série ; des shunts assurent la continuité de la ligne en cas d'accident aux appareils.

A l'extrémité de la ligne, un potentiomètre permet de régler la tension à la valeur convenable suivant le nombre de télérupteurs en série.

Les émissions de courant sont faites, comme pour les télérupteurs Proust, au moyen d'interrupteurs commandés automatiquement par horloge.

Les caractéristiques électriques du télérupteur Brillié sont :

|                                        |                                                    |      |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|------|
| Tension en volts.....                  | 1,4 courant continu ou courant alternatif redressé |      |
| Intensité du courant en ampères.....   |                                                    | 0,31 |
| Consommation en watts.....             |                                                    | 0,43 |
| Résistance en ohms télérupteur .....   |                                                    | 4,50 |
| » shunt .....                          |                                                    | 9    |
| » ensemble (shunt et télérupteur)..... |                                                    | 3    |

*Dispositif utilisé pour l'emploi des lampes à incandescence à 2 filaments sur les circuits en série à fil unique.* — La substitution de lampes à incandescence à deux filaments aux lampes à arc montées en



série, a soulevé un problème assez délicat : il faut, avec un circuit ne comprenant qu'un seul fil, pouvoir commander l'allumage et l'extinction de chaque filament (avec comme condition essentielle qu'il n'y ait pas d'extinction totale sensible au moment du passage de l'éclairage intensif à l'éclairage réduit ; de plus, en cas de destruction

SCHEMA DU DISPOSITIF DE LA C<sup>e</sup> DES COMPTEURS

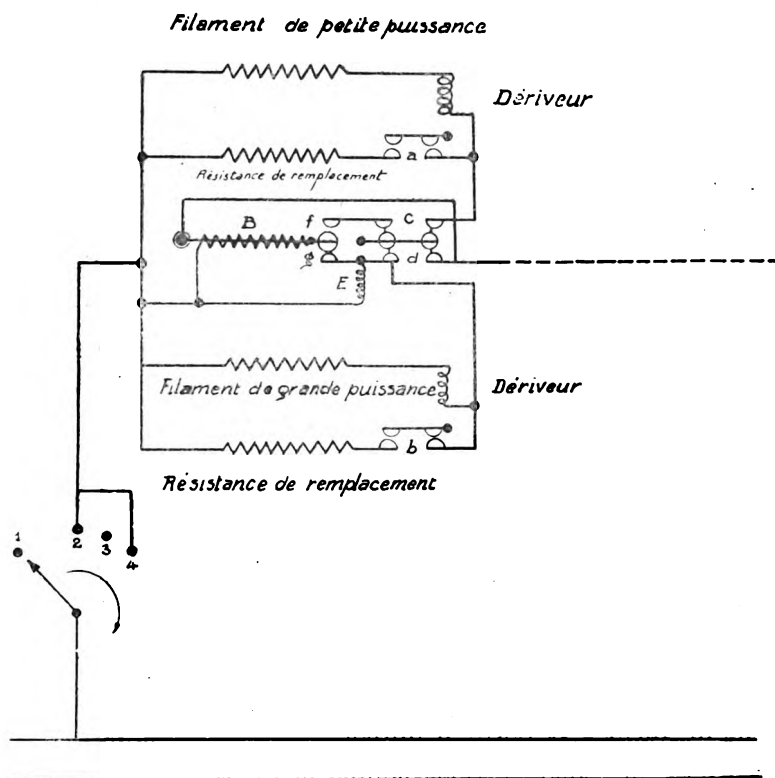


Fig. 25. — Montage en série des lampes à 2 filaments.

d'un filament, celui-ci doit être automatiquement remplacé par une résistance convenable.

Le problème a été résolu par la Compagnie des Compteurs, qui a réalisé le dispositif représenté par le schéma fig. 25.

Ce dispositif comprend essentiellement : 1° un bilame portant un contact double et avec fil chauffant monté en dérivation aux bornes de la lampe ; 2° un relais à deux contacts qui produit la réduction de

l'éclairage par changement de filament ; 3° 2 relais jouant le rôle de dériveurs en cas de destruction des filaments.

### C) *Commande à distance sans fil pilote*

Deux dispositifs différents sont actuellement installés, l'un à Marseille, l'autre à Paris. Nous allons les décrire très sommairement :

1° *Dispositif utilisé par la Ville de Marseille.* — Cette installation a été réalisée, en août 1926, par la Société « l'Action à Distance » et la Compagnie pour la fabrication des Compteurs et matériel d'usines à gaz.

Les circuits d'éclairage public du centre de la Ville sont commandés à distance au moyen de 33 relais actionnés par un courant de fréquence musicale. Leur fonctionnement est basé sur le principe suivant :

Un courant à la fréquence de 1 000 p: s est injecté, d'un poste d'émission (sous-station du Muy) dans l'ensemble des câbles du réseau à courant continu.

Les relais placés aux points d'utilisation sont actionnés par ces émissions et agissent sur les contacteurs des circuits d'éclairage.

Le courant, à fréquence musicale, injecté automatiquement à chaque manœuvre, comprend une série d'émissions de courte durée, suivies d'une émission de longue durée.

Les premières ont pour but de sélectionner la manœuvre à réaliser ; la seconde, d'opérer cette manœuvre et de ramener ensuite le mécanisme du relais à sa position initiale.

Dans ce but, chaque relais comporte un réglage spécial dépendant du nombre d'émissions courtes qu'il doit recevoir et qui correspondent à l'opération à effectuer.

*Description du poste d'émission* (fig. 26). — Un alternateur à la fréquence de 1 000 p: s est entraîné à vitesse constante par un moteur à courant continu tournant à 3 000 t: mn.

L'un des pôles de l'alternateur est relié à la terre.

L'autre, par l'intermédiaire de trois condensateurs de 100  $\mu$ F ayant un pôle commun, est connecté à chacune des trois lignes du réseau continu à  $2 \times 220$  V alimentant les foyers d'éclairage.



# Ville de Marseille

Poste d'émission de la S/s-Station  
du Muy

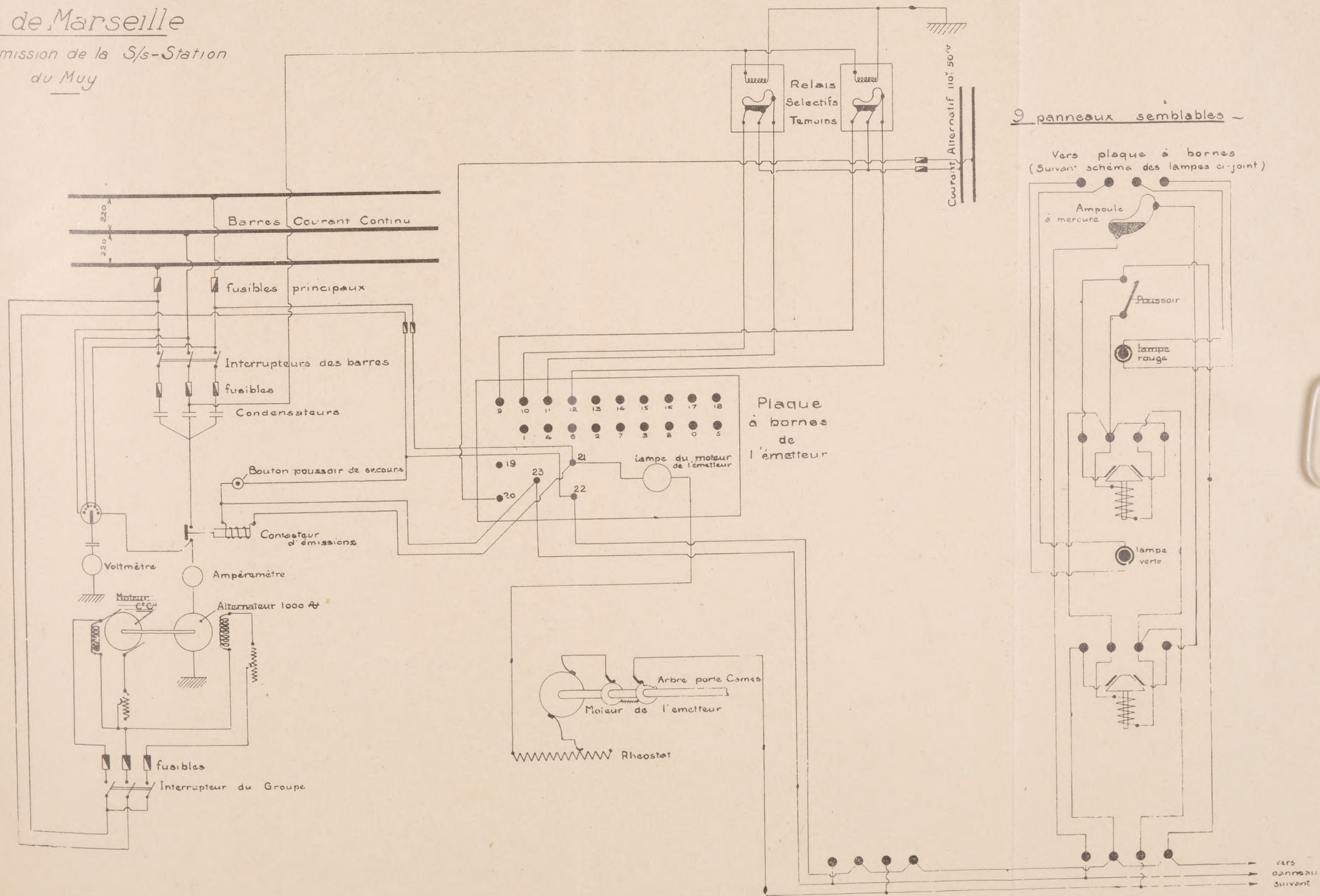


Fig. 26.





Le dispositif automatique de commande des émissions est constitué par un arbre à cames qu'un petit moteur entraîne à vitesse réduite au moyen d'un système démultiplicateur.

Les cames portent chacune un nombre différent de bossages courts correspondant au nombre d'émissions courtes à effectuer et un bossage plus long correspondant à l'émission longue (fig. 26).

Chacune des cames, par l'intermédiaire d'un levier, commande un interrupteur qui ferme et ouvre le circuit d'excitation de l'alternateur, produisant ainsi une série d'émissions dont la durée est égale à celle du passage du levier sur un bossage.

A chaque opération, l'arbre à cames doit exécuter un tour complet. A cet effet, une came spéciale calée sur cet arbre et n'ayant qu'une encoche ferme, par l'intermédiaire d'une touche et d'un électro-aimant, le circuit du petit moteur de commande. Quand la touche arrive dans l'encoche, le circuit du moteur est coupé et l'arbre s'arrête toujours dans la même position.

Le schéma du poste d'émission (fig. 26) montre comment sont disposés les panneaux commandant les différentes manœuvres. On voit également figurer sur le dessin les relais sélectifs témoins qui allument les lampes rouges et vertes indicatrices placées sur ces panneaux.

Il y a 3 panneaux semblables pour les différentes opérations à réaliser concernant l'allumage et l'extinction des foyers.

*Relais récepteurs.* — Les relais sont branchés, à leur point d'utilisation, entre l'un des conducteurs et la terre. Ils comportent un système moteur composé de deux électro-aimants alimentés par le courant de fréquence musicale et d'un disque en aluminium qui peut tourner entre les pôles des électros placés en regard (dispositif volt-métrique d'induction). Ce disque monté sur un axe, entraîne par accouplement élastique un plateau muni d'un doigt.

A chacune des émissions courtes, le doigt fait avancer d'une dent une roue à rochet solidaire d'une pièce en forme de Z portant à chaque extrémité un ergot.

Après une série d'émissions courtes correspondant au réglage de l'appareil, un des doigts a pris une position déterminée qui lui permet d'agir sur la rampe d'un levier auquel est fixé un interrupteur à mercure.

L'émission longue, qui suit toute série d'émissions courtes, fait alors déplacer le doigt et basculer le levier. A la fin de l'émission



de ses nouveaux procédés d' « Action à Distance ». Il est basé sur le principe suivant :

Un courant à fréquence musicale variable est injecté dans le feeder

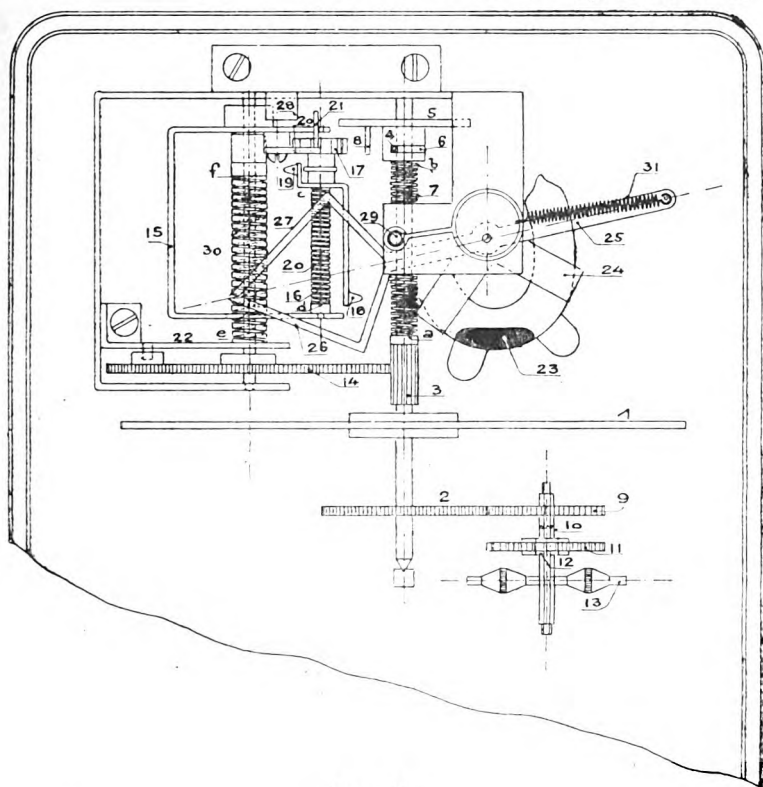


Fig. 28.

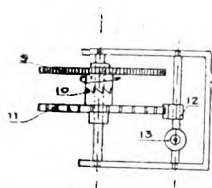


Fig. 29. — Vue du régulateur.  
(La roue 9 tournant dans le sens de la flèche entraîne la roue 11, le régulateur fonctionne; pour le sens contraire, la roue 9 étant folle sur l'axe, le régulateur n'agit pas.)

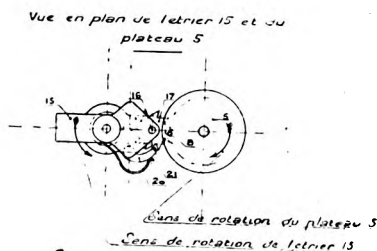


Fig. 30.

qui alimente le poste de transformation sur lequel sont branchés les appareils d'éclairage de cette avenue. L'injection de ce courant se fait à l'aide d'un transformateur spécial, embroché en série sur le feeder intéressé.

La réception est faite, dans chaque candélabre électrique, au moyen d'un relais branché en dérivation sur les conducteurs du câble amenant le courant aux appareils. Ce relais comporte deux éléments ré-

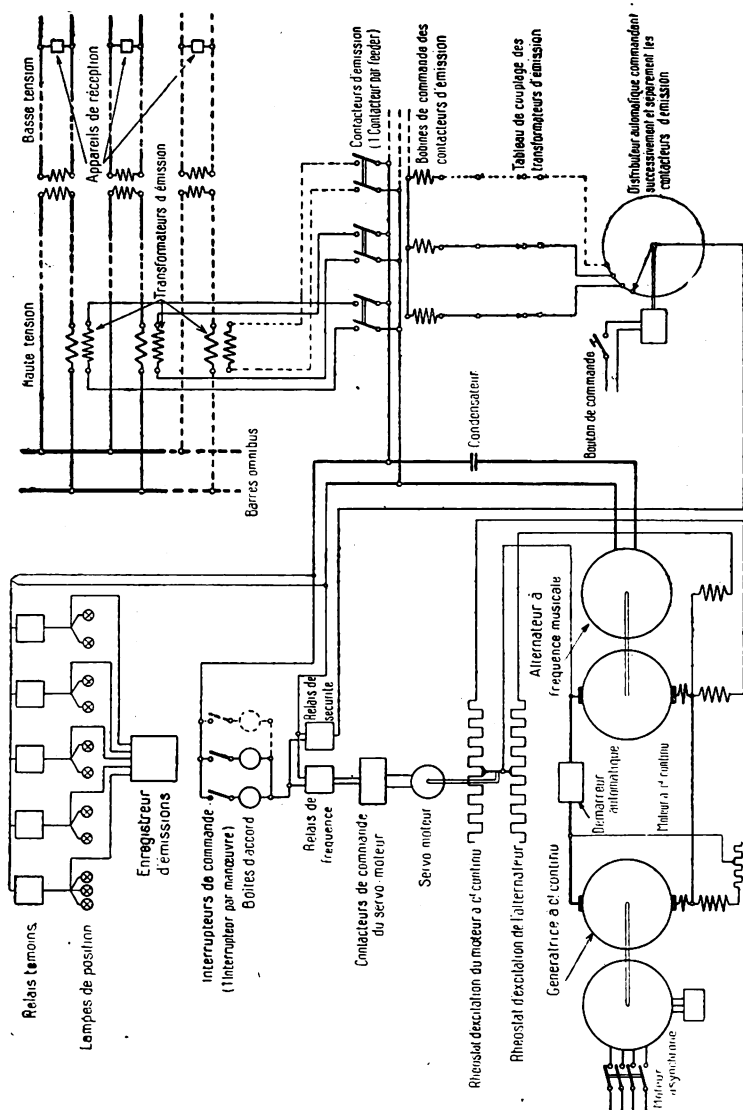


Fig. 31.

cepteurs bien distincts correspondant chacun à un filament.

La manœuvre complète comprend l'émission de trois courants de fréquence différente. L'un de ces courants agit simultanément sur



les deux éléments récepteurs pour provoquer l'allumage des deux filaments. Chacun des deux autres courants agit respectivement sur un seul des éléments pour provoquer à des heures différentes l'extinction des deux filaments.

Ainsi se trouve réalisé le système sélectif pour les différentes opérations à effectuer et qui sont dans l'ordre :

- 1° allumage simultané des deux filaments ;
- 2° extinction de l'un des filaments (éclairage réduit) ;
- 3° extinction du second filament (extinction totale).

Les différentes émissions sont effectuées automatiquement à la sous-station « Ternes » d'où part le feeder d'alimentation.

*Description du poste d'émissions (fig. 31).* — Le poste a été installé fin 1927 pour actionner primitivement les relais commandant les minuteries des compteurs à triple tarifs et par la suite a été utilisé pour la commande d'allumage et d'extinction des foyers d'éclairage public. Le courant d'excitation des relais est produit par un alternateur à fréquence musicale variable.

Cet alternateur est entraîné par un groupe du genre Ward Léonard à vitesse variable, qui permet d'obtenir une gamme d'émissions variant de 400 à 1 000 p. s environ.

La constance de la vitesse pour la valeur de la fréquence à réaliser est obtenue au moyen de relais fréquencemétriques agissant sur un régulateur de vitesse. Un régulateur de tension, dont le fonctionnement est solidaire de celui du régulateur de vitesse, assure, pour toutes les fréquences, une tension constante aux bornes de l'alternateur et par suite aux bornes des relais.

Le régulateur de vitesse et de tension est essentiellement constitué par un servo-moteur commandé par le relais fréquencemétrique qui agit simultanément sur le rhéostat du moteur à vitesse variable entraînant l'alternateur et sur le rhéostat d'excitation de celui-ci. Un relais fréquencemétrique de sécurité contrôle le relais fréquencemétrique de réglage et empêche toute émission d'avoir lieu si elle ne correspond pas à la fréquence particulière de la manœuvre que l'on veut effectuer.

Le transformateur d'émission, monté en série sur le feeder, a son secondaire court-circuité automatiquement par des contacteurs en

dehors des périodes d'émission, pour éviter les surtensions instantanées en cas de court-circuit violent sur le feeder.

Au moment de l'émission le contacteur, commandé par un émetteur automatique, ouvre le circuit secondaire du transformateur et le branche ensuite sur l'alternateur.

L'émetteur automatique se compose essentiellement d'un moteur à vitesse constante entraînant, par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, un balai mobile sur une couronne de plots. La mise en marche du moteur s'effectue par un bouton de commande, son arrêt se fait automatiquement quand la série des émissions est terminée.

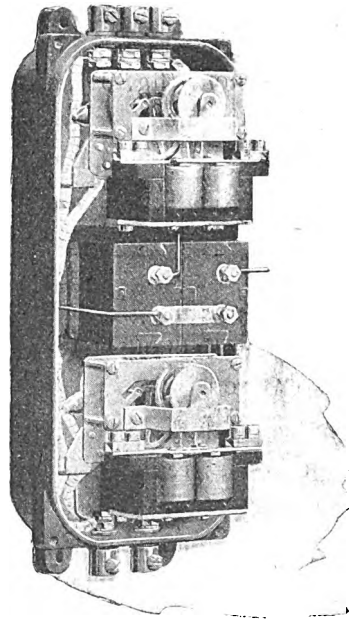


Fig. 32. — Relais ADE 12.

*Relais récepteurs* (fig. 32). — En réalité, le relais type A.D.E.12 comporte deux relais du même genre. Chacun d'eux comprend un aimant permanent dont les extrémités polaires, shuntées par deux noyaux magnétiques feuilletés, sont séparées par un entrefer.

Sur chacun des noyaux est montée une bobine dont les enroulements sont reliés en série ; aux extrémités de l'aimant sont fixées deux lames vibrantes, en métal magnétique, ayant chacune une fréquence

propre déterminée. Ces lames portent respectivement, à leur extrémité libre, deux cliquets en acier qui attaquent chacun une roue à rochet solidaire d'un pignon planétaire. Entre les deux pignons planétaires tourne un axe transversal portant à une de ses extrémités un pignon satellite.

Ce système différentiel entraîne par un train d'engrenages réducteur, un interrupteur à mercure placé dans le circuit de l'un des filaments.

Le second relais identique au précédent assure l'allumage et l'extinction du second filament.

Les deux bobines de chaque dispositif sont reliées à un condensateur dont la capacité est accordée pour une fréquence moyenne comprise entre celles des lames vibrantes.

*Fonctionnement.* — Quand un courant de fréquence musicale égale à la fréquence de l'une des lames parcourt le système accordé, cette lame vibre en résonnance et son cliquet entraîne la roue à rochet et son pignon planétaire correspondant.

Celui-ci entraîne à son tour l'arbre satellite solidaire de l'axe du différentiel, lequel agit sur l'interrupteur à mercure pour fermer le circuit dans lequel il est inséré ; quand le mouvement de l'interrupteur est terminé, le train réducteur est bloqué. C'est alors le pignon satellite qui tourne sur son arbre devenu fixe et entraîne le second planétaire en sens inverse du premier, tant que dure le courant d'émission.

À la seconde émission, de fréquence égale à celle de l'autre lame celle-ci par son cliquet, entraîne le différentiel en sens inverse de la première manœuvre et l'interrupteur à mercure coupe le circuit du filament.

Le second relais fonctionne d'une façon identique, mais à une fréquence différente, pour l'extinction du filament qu'il contrôle. L'emploi de lampes à double filament à marche séparée a amené l'étude d'un nouveau dispositif de commande.

La Compagnie des Compteurs a réalisé, pour répondre à ce but, un relais type A.D.E. 22 (fig. 33) plus simple qui ne comprend qu'un élément récepteur commandant les deux interrupteurs à mercure correspondant respectivement au contrôle des deux filaments.

Ce récepteur comprend essentiellement un circuit électro-magnétique polarisé, 3 lames vibrantes ayant des périodes propres différentes, 3 roues à rochets respectivement attaquées par ces lames au

moyen de cliquets, un système de débrayage des cliquets, un train d'engrenages réducteur, deux cames et deux interrupteurs à mercure. Les deux cames, montées sur le même arbre, ont trois positions d'arrêt par tour, correspondant chacune à une fréquence du courant d'émission :

la première correspondant à l'allumage du premier filament ;

la deuxième correspondant à l'allumage du deuxième filament et à l'extinction du premier ;

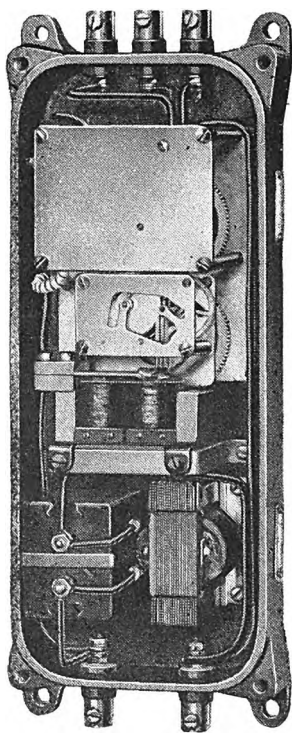


Fig. 33.

la troisième à l'extinction du deuxième filament.

Ces appareils, enfermés dans un carter complètement étanche et de dimensions plus réduites que celles du relais A.D.E.12 seront, comme les appareils précédemment décrits, branchés sur la canalisation à 110 V.

Comme conclusion, on peut dire que les deux systèmes qui ont été expérimentés, le premier à Marseille, le deuxième à Paris et que

nous venons de décrire, donnent actuellement des résultats satisfaisants et concluants.

Il est certain qu'une mise au point assez longue et assez délicate a été nécessaire pour amener ces systèmes à fonctionner normalement et d'une façon régulière, mais on peut dire que les appareils actuellement réalisés remplissent toutes les conditions que l'on s'était imposées.

Le système de Marseille, qui peut être considéré comme le système primitif, est d'une application moins générale puisqu'il ne permet de faire les émissions qu'entre fil et terre, tandis que celui qui a été installé à Paris, permet, dans tous les cas, d'injecter entre fils le courant à fréquence musicale.

De plus, lorsqu'il est utilisé sur des réseaux à courant alternatif haute tension, le premier système nécessite l'emploi de relais supplémentaires qui, actionnés par les émissions faites sur les canalisations haute tension, produisent à leur tour de nouvelles émissions entre un câble de la canalisation basse tension et la terre.

Signalons, enfin, que le système installé à Paris permet la commande des lampes à deux filaments et serait ainsi tout particulièrement indiqué pour les installations, assez rares d'ailleurs, qui comprennent ce type de lampes.

#### D) *Cellules Photo-Electriques*

Au cours de l'année 1928 on a muni, en Angleterre, quelques installations d'éclairage public de cellules photo-électriques.

D'après certaines revues techniques anglaises, le fonctionnement de ces cellules photo-électriques serait satisfaisant. Les essais réalisés en France et, en particulier, à Paris semblent indiquer que ces appareils ne sont pas encore suffisamment au point pour que l'on puisse, dès maintenant, envisager leur emploi systématique pour la commande des foyers.

## II. — EXTENSION DE L'ECLAIRAGE PUBLIC A PARIS EN 1928

Pendant l'année 1928 un grand nombre de foyers électriques d'éclairage public ont été installés à Paris. En effet, 1 590 foyers nouveaux ont été mis en service. Cet accroissement de 25 pour cent porte le

nombre total des foyers fin 1928 à 7 789, dont 1 695 à arc et 6 094 à incandescence.

Le tableau n° 3 montre l'évolution de l'éclairage public de 1920 à 1928. Nous allons examiner rapidement ci-dessous les diverses caractéristiques des installations d'éclairage public réalisées à Paris.

### 1° APPAREILS D'ÉCLAIRAGE, GLOBES, LAMPES

Les principaux types d'appareils n'ont pas été modifiés. Toutefois, en ce qui concerne les anciennes lanternes à gaz d'un modèle spécial et qui n'ont pu, pour des raisons d'esthétique, être remplacées au moment où l'éclairage au gaz a fait place à l'électricité, de nouveaux types transformés sont venus s'ajouter à ceux qui avaient déjà été utilisés. C'est ainsi que l'on a été conduit à conserver les anciens appareils existants dans la Cour du Vieux-Louvre, sous les Galeries de l'Odéon, etc...

On a continué à équiper les installations nouvelles presque exclusivement avec les globes réfracteurs type Holophane. Une exception a été faite pour les trois foyers du candélabre Haussmann où on a utilisé des réflecteurs chromés avec globe opale.

Les lampes à incandescence à un filament tendent à disparaître. Un certain nombre de groupes d'appareils trilampes ont été remplacés par des lampes à deux filaments montées dans des réfracteurs Holophane.

Dans un avenir prochain, les lampes à un filament fonctionnant sous la tension de 110 V, ne seront plus utilisées que pour l'équipement des appareils de faible puissance et éventuellement pour remplacer quelques lampes isolées provenant des circuits d'arcs regroupés.

L'emploi des lampes à incandescence à deux filaments s'est considérablement généralisé en 1928 ; d'ailleurs, certains progrès ont été réalisés dans leur fabrication pendant la même période (meilleure forme des filaments, moyenne de durée des lampes portée de 800 à 1 200 h.). On a utilisé en 1928 uniquement des lampes à deux filaments, dites à marche simultanée (parce que les 2 filaments sont allumés ensemble pendant la période d'éclairage intensif). Ce type de lampe est destiné à disparaître et à être remplacé par des lampes à marche séparée des deux filaments avec lesquelles on peut améliorer le rendement lumineux du filament de petite puissance, tout en conservant une durée d'utilisation suffisante.

TABLEAU III. — Évolution de l'éclairage public par l'électricité à Paris.

|                                                  | 1920  | 1921  | 1922  | 1923  | 1924  | 1925  | 1926  | 1927  | 1928  |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>NOMBRE DE FOYERS INSTALLÉS :</b>              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Arcs (type Bardon vase clos)...                  | 2 400 | 2 402 | 2 392 | 2 381 | 2 326 | 2 176 | 2 153 | 1 833 | 1 695 |
| Incandescence .....                              | 78    | 91    | 419   | 1 644 | 2 099 | 2 888 | 3 671 | 4 366 | 6 094 |
| Total.....                                       | 2 478 | 2 493 | 2 811 | 4 025 | 4 425 | 5 064 | 5 824 | 6 199 | 7 789 |
| <b>PUISSANCE INSTALLÉE EN KW :</b>               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Arcs.....                                        | 1 083 | 1 087 | 1 094 | 1 072 | 1 051 | 991   | 977   | 837   | 778   |
| Incandescence .....                              | 4     | 40    | 271   | 1 096 | 1 407 | 1 761 | 2 127 | 2 483 | 3 367 |
| Total.....                                       | 1 087 | 1 097 | 1 368 | 2 168 | 2 458 | 2 752 | 3 104 | 3 320 | 4 145 |
| <b>NOMBRE DE KILOMÈTRES DE VOIES ÉCLAIRÉES :</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Arcs.....                                        | 52    | 52    | 52    | 52    | 52    | 48,5  | 48    | 43,5  | 41,7  |
| Incandescence .....                              | 0,200 | 0,5   | 6,5   | 30    | 42,5  | 65,8  | 93    | 109,5 | 163,3 |

Le tableau n° 4 donne la répartition des foyers en service suivant la nature des appareils d'éclairage.

## 2° SUPPORTS DES FOYERS

a) *Candélabres en fonte* : On a continué au cours de l'année 1928, à placer des candélabres à crosses dans la plupart des voies plantées, réservant les lyres pour les voies non plantées.



Fig. 34. — Candélabre du carrefour Drouot-Haussmann.

Les rues à trottoirs étroits sont équipées avec des candélabres dits de façades dont l'encombrement est très réduit, ou avec des crosses scellées sur les immeubles dont l'emploi commence à se généraliser.



b) *Eclairage axial* : Deux installations d'éclairage axial ont été faites; l'une, rue de l'Orillon, comprend 7 foyers avec lanternes mobiles et treuil double ; l'autre, passage du Bureau (voie privée) comprend 6 foyers fixes du type Compagnie Provençale d'Entreprises.

c) *Candélabre monumental* : On a installé, au mois de mai 1928, au Carrefour Drouot-Haussmann, un candélabre vraiment monumental puisque sa hauteur totale est de 13,90 m et que ses trois foyers sont placés à une hauteur de 11,25 m. D'ailleurs, cet appareil s'harmonise si bien avec les constructions qui l'entourent, que ses dimensions paraissent presque normales. Ce candélabre (fig. 34) comprend un socle de granit, une borne de 3,785 m de haut, un fût décoré surmonté de 3 consoles. Les appareils d'éclairage comprennent un réflecteur en métal chromé et un globe opalin. Les lampes installées sont à deux filaments d'une puissance de 1 500 W en régime variable et 400 W en régime permanent.

La grande hauteur des foyers lumineux a nécessité un dispositif spécial de manœuvre pour permettre le nettoyage des appareils et le remplacement des lampes hors d'usage. Ce dispositif est constitué par 3 treuils installés dans la borne et qui permettent la montée ou la descente des appareils.

L'éclairement horizontal au sol, qui atteint 55 à 63 lux au pied du candélabre, est encore de 15 lux à 15 mètres ; l'éclairement minimum à 25 m est égal à 7 lux, 5.

d) *Candélabres en acier* : L'intensité de la circulation dans les rues de Paris cause des accidents nombreux aux candélabres (350 accidents en 1928, contre 168 en 1920). En présence de cette situation et pour éviter autant que possible la projection des débris sur la voie publique au moment du choc, on a adopté des types nouveaux d'appareils avec armature en acier qui doivent remplacer les anciens candélabres en fonte.

En 1928, il a été posé 238 de ces appareils.

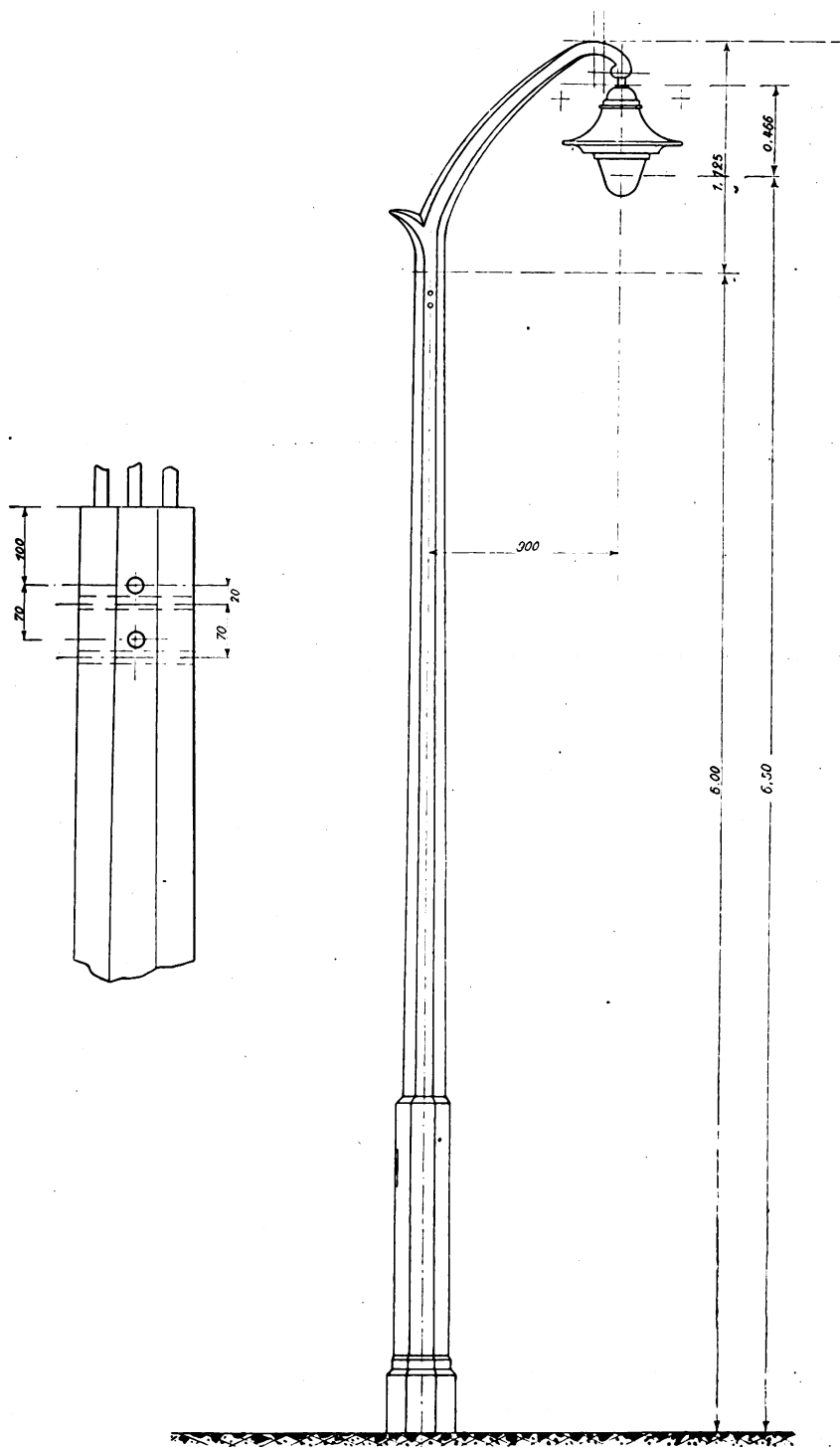
### III. — EXTENSION DE L'ECLAIRAGE PUBLIC DANS LA BANLIEUE DE PARIS

Nous allons examiner successivement les installations effectuées pendant l'année 1928 sur les divers réseaux qui se partagent la distribution de l'électricité dans la banlieue de Paris.

TABLEAU IV. — Nombre de foyers en service.

| SITUATION AU 31 DÉCEMBRE DES ANNÉES          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NATURE DES FOYERS                            | 1920  | 1921  | 1922  | 1923  | 1924  | 1925  | 1926  | 1927  | 1928  |
| LAMPES A ARC. ....                           | 2 400 | 2 402 | 2 392 | 2 381 | 2 326 | 2 176 | 2 153 | 1 833 | 1 695 |
| LAMPES A INCANDESCENCE :                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| unilampes....                                | 4     | 15    | 64    | 266   | 266   | 307   | 303   | 308   | 145   |
| Appareils avec reflecteur                    | »     | »     | 5     | 61    | 62    | 63    | 53    | 53    | 52    |
| métallique et globe opale                    | »     | 2     | 270   | 893   | 1 010 | 1 015 | 961   | 936   | 762   |
| trilampes....                                | »     | »     | 6     | 125   | 456   | 964   | 193   | 482   | 858   |
| Appareils { Avec lampe à 1 filament ...      | »     | »     | »     | »     | 6     | 240   | 1 862 | 2 262 | 3 810 |
| Holophane { Avec lampe à 2 filaments....     | »     | »     | »     | »     | »     | 299   | 299   | 299   | 388   |
| Appareils divers de faible puissance (1).... | 74    | 74    | 74    | 299   | 299   | 299   | 299   | 299   | 388   |
| Foyers d'installations provisoires (2).....  | »     | »     | »     | »     | »     | »     | »     | 26    | 79    |
| Total :                                      | 78    | 91    | 419   | 1 644 | 2 099 | 2 888 | 3 671 | 4 366 | 6 094 |
| Total général :                              | 2 478 | 2 493 | 2 811 | 4 025 | 4 425 | 5 064 | 5 824 | 6 199 | 7 789 |

|                                |     |                          |    |                            |    |
|--------------------------------|-----|--------------------------|----|----------------------------|----|
| (1) Pont de Passy.....         | 74  | (2) Pont Mirabeau .....  | 12 | Report.....                | 47 |
| Boulevard Exelmans .....       | 225 | Rue du Vélodrome.....    | 4  | Porte de Saint-Cloud ..... | 4  |
| Galerías de l'Odéon .....      | 51  | Porte Champerret.....    | 17 | Boulevard Poniatowski..... | 19 |
| Verrines du Parc Monceau ..... | 14  | Porte de Versailles..... | 9  | Rue des Grands-Champs..... | 5  |
| Quelques foyers isolés....     | 24  | Porte Brancion.....      | 5  | Place de l'Europe .....    | 4  |
|                                | 388 |                          | 47 |                            | 79 |



IMPLANTATION 17<sup>m</sup>.50

FIG. 35. — Candélabre de 6,50 m

1° BANLIEUE NORD (*Réseau Nord-Lumière*)

Huit cents foyers d'éclairage intensif ou de jalonnement ont été installés dans les localités suivantes : Argenteuil, Saint-Ouen, Le Bourget, Courbevoie, Pantin, Epinay, Gennevilliers, La Courneuve, Deuil, Arnouville, Aubervilliers, etc...

Le tableau suivant donne les caractéristiques de ces installations :

|                                                 | LONGUEUR<br>DESSERVIE<br>en km | PUISSANCE<br>TOTALE<br>en kW | PUISSANCE<br>DES<br>LAMPES<br>en W | HAUTEUR<br>DES<br>FOYERS<br>en m | DISTANCE<br>ENTRE<br>FOYERS<br>en m | DISPOSITION<br>DES FOYERS                              |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Voie éclairée<br>d'une manière<br>intensive.... | 19                             | 21,5                         | 500                                | 6,50                             | 40                                  | en quinconce<br>autant que<br>possible en<br>quinconce |
| Voies jalonnées.                                | 25                             | 41,6                         | 100 à 200                          | 6,50                             | 60 à 80                             |                                                        |

Parmi ces 800 foyers : 378 sont supportés par des candélabres intersecteurs (fig. 35 et 36), 24 par des candélabres en fonte, 3 par des candélabres à deux feux (fig. 37) ; 416 par des consoles ; 3 par des suspensions axiales : 2 avec treuil type Grimmeisen, une avec suspension type de la Compagnie Provençale d'Entreprises.

Les caractéristiques de ces candélabres sont les suivantes :

|                              | HAUTEUR DU<br>POINT LUMINEUX<br>en m | AVANCÉE<br>DU FOYER<br>en m | ALIMENTATION               | COUPE-<br>CIRCUITS    |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Candélabres « Intersecteur » | 6,50                                 | 0,90                        | aérienne ou<br>souterraine | dans le<br>candélabre |
| Candélabres en fonte .....   | 5,75                                 | 0,80                        | aérienne                   | aériens               |
| Candélabres à 2 foyers.....  | 9,50                                 | 1,00                        | souterraine                | dans le<br>candélabre |

Les consoles (fig. 38) sont scellées sur les façades ou fixées sur les poteaux de ligne, elles ont 0,80 m ou 1,20 m de longueur.

Les installations d'éclairage intensif ont été réalisées à l'aide de lanternes inoxydables en cuivre rouge de 8/10, munies de réfracteurs Holophane n° 4433.

Pour l'éclairage de jalonnement, on a utilisé quelques diffuseurs plats en cuivre et porcelaine, mais surtout des lanternes en fonte type

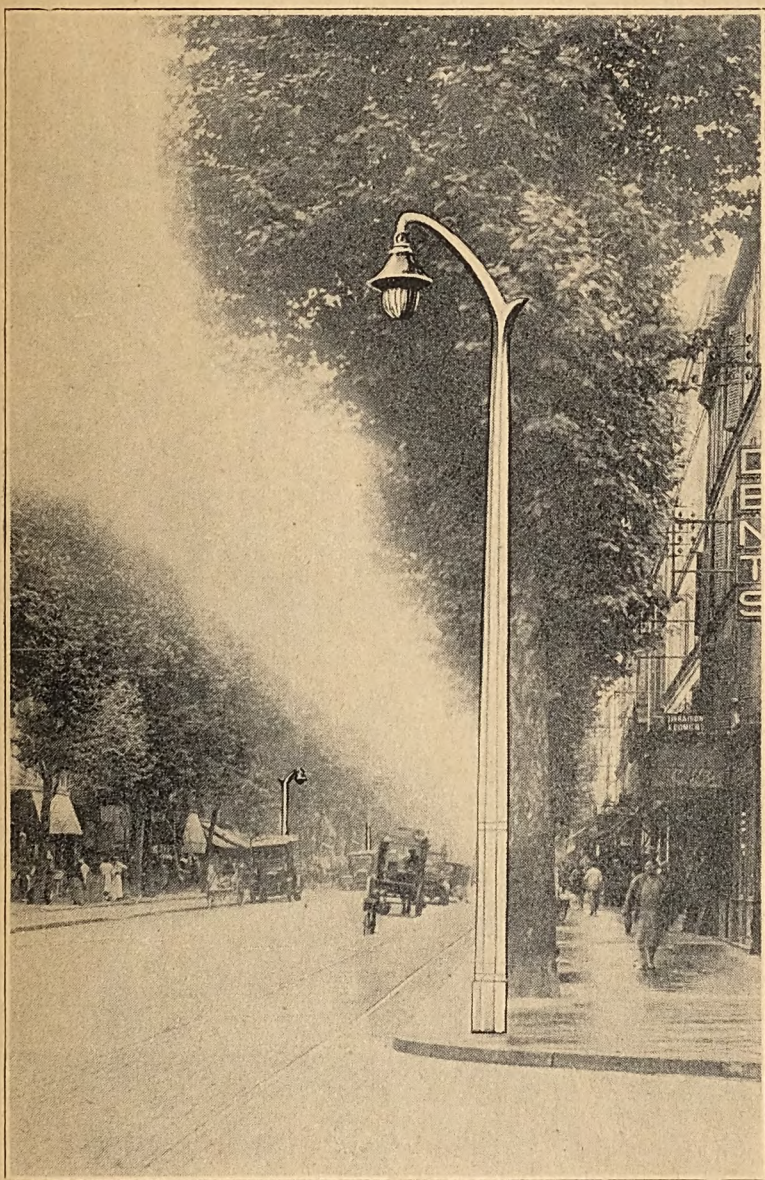


Fig. 36.

Eclairage Technique n° 65 501 avec réfracteur type B et raccord à rotule.



Signalons, enfin, un dispositif spécial pour l'éclairage des routes actuellement en cours d'exécution.

Un poteau phare (voir fig. 39) de 28,50 m de hauteur dont 26 m

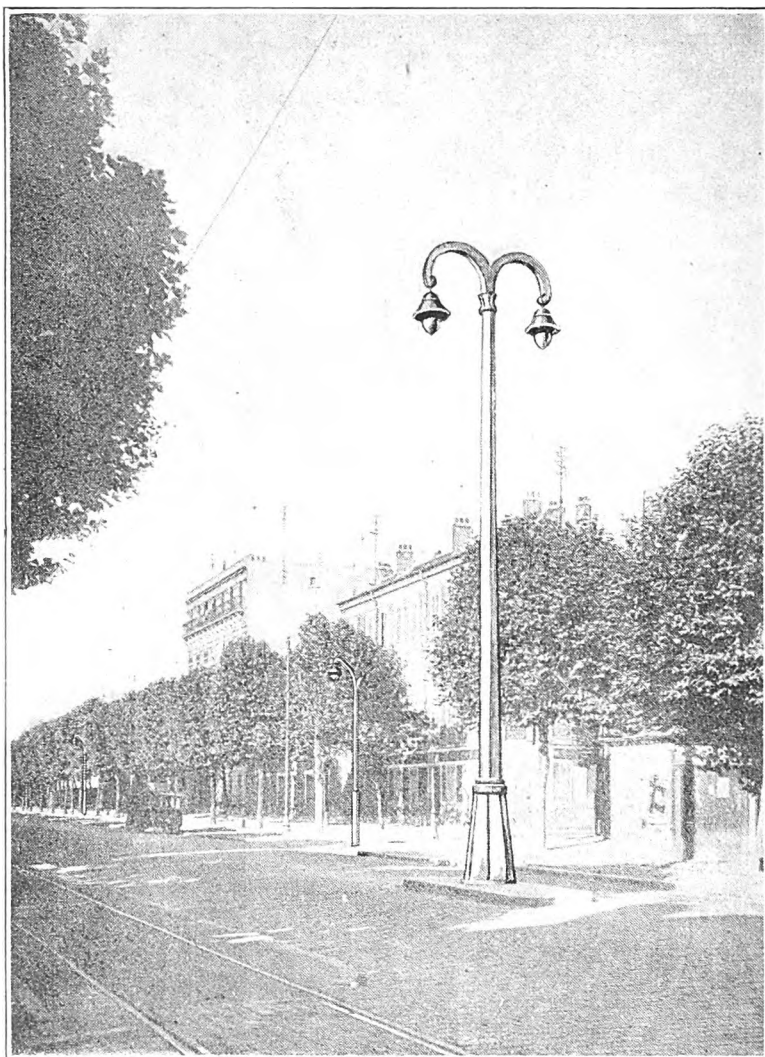


Fig. 37.

hors sol installé au rond point de Picardie à Saint-Denis sera prochainement équipé avec 4 projecteurs comprenant chacun une lampe de 1 500 W.

Ces projecteurs assureront l'éclairage de 4 routes (route d'Epinay,

de Pierrefitte, de Gonesse, rue de Paris) qui aboutissent au rond-point, jusqu'à une distance de 220 m à partir du pied de l'appareil.

L'éclairement moyen sur le sol sera d'environ 1,2 lux.

## 2° BANLIEUE EST (*Réseau de l'Est-Lumière*)

Sur ce réseau, ce sont les appareils à suspension axiale qui l'emportent de beaucoup, puisque toutes les installations nouvelles d'éclairage intensif ont été réalisées avec ce type d'appareil. Il a été installé en

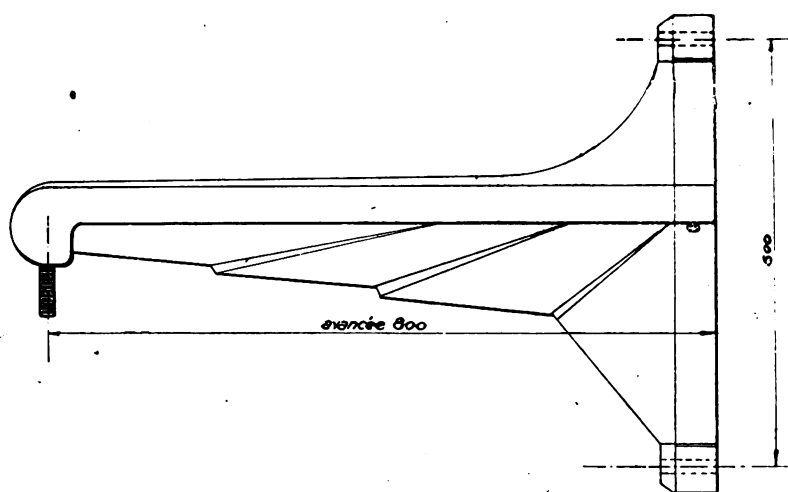


Fig. 38.

1928, 534 foyers dans 26 km de voies (sans faire état de l'éclairage de jalonnement réalisé avec lampes de 50 à 100 W).

Les appareils à suspension axiale utilisés présentent la particularité de ne pas posséder de globe ; celui-ci est remplacé par une jupe en verre légèrement opale ou dépoli.

Le câble de suspension en cuivre nu à une section de 60 mm<sup>2</sup> ; les câbles d'acier et toutes les ferrures susceptibles de se rouiller sont supprimées. Le câble porteur est amarré à des crochets à double scellement fixés sur façades ou à des poteaux en ciment armé s'il n'existe aucun immeuble à proximité.

La hauteur du point lumineux est de 9,50 m au-dessus de la chaussée. On dispose, pour l'entretien des appareils, d'une échelle à coulisse montée sur voiture automobile spéciale.

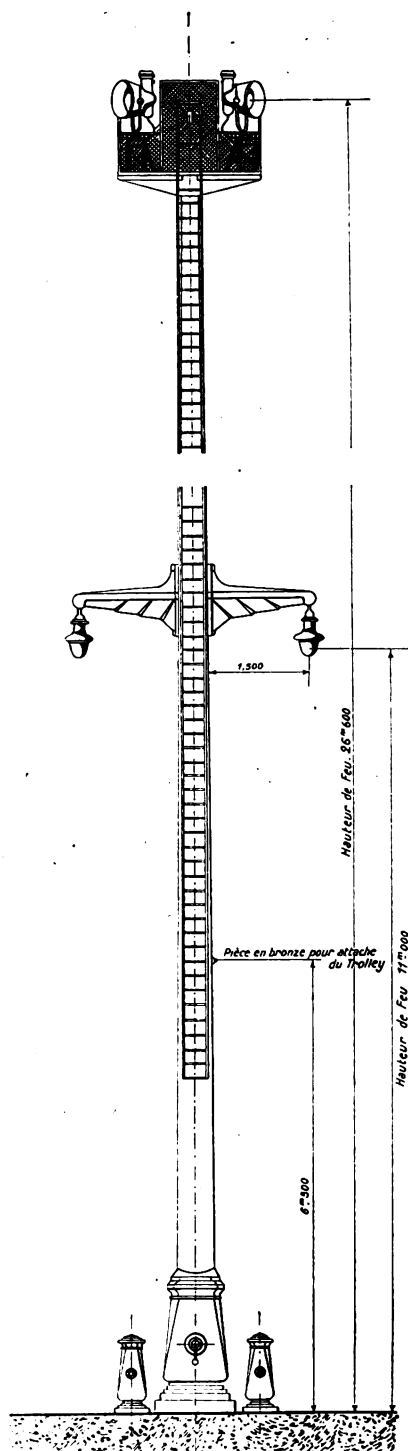


FIG. 39. — Potcau-phare rond-point de Picardie à Saint-Denis



En principe, les poteaux en ciment armé sont placés dans l'alignement des arbres et sont peu apparents. Le câble est placé à une hauteur telle que les foyers lumineux se trouvent uniformément à 9,50 m au-dessus de la chaussée.

La lanterne est fixée au câble au moyen d'un manchon en forme de crochet, bloqué par des boulons qui agissent sur une gouttière en métal mou, disposé à cheval sur le câble à l'intérieur du crochet.

L'alimentation de la lanterne est assurée par un branchement en deux câbles souples 18/10° à fort isolement.

Les circuits spéciaux d'éclairage public sont constitués par des canalisations aériennes établies sur les supports des canalisations qui sont utilisés pour la distribution de l'énergie.

La commande de chaque circuit est assurée par des interrupteurs Ghielmetti à deux allumages, double tarification avec remontage automatique et réglage astronomique.

La fig. 40 montre l'éclairage réalisé route de Créteil, à Maisons-Alfort, à un endroit où il ne se trouve aucune maison en bordure de la route.

### 3° BANLIEUE SUD (*Réseau du Sud-Lumière*)

Comme le réseau de l'Est-Lumière, le réseau du Sud-Lumière a fixé son choix pour les installations d'éclairage intensif, sur les appareils à suspension axiale. En 1928, 513 lanternes axiales représentant 13 km de voies, ont été mises en service.

On a d'ailleurs, en plus de ces foyers puissants, installé pendant la même période 1 077 lanternes de jalonnement représentant 115 km de voies avec canalisation d'alimentation placée sur les supports des canalisations utilisées pour la distribution de l'énergie.

Un seul type de lanterne est utilisé (fig. 41) avec cependant un calibre plus petit pour les appareils de jalonnement prévus pour une puissance maximum de lampe de 200 W que pour les appareils à suspension axiale prévus pour une puissance de lampe de 300 W et au-dessus.

Les appareils, comme ceux qui ont été installés dans la banlieue Est, sont dépourvus de globes ; une bande diffusante cylindrique, en verre légèrement dépoli, évite l'éblouissement.

Les lanternes peuvent être munies indifféremment d'un miroir en cuivre poli ou en verre argenté.



La lanterne axiale est suspendue, par l'intermédiaire d'un tube, à un câble en cuivre de 30 mm<sup>2</sup> de section fixé à ses extrémités par des crochets d'ancrage sur les immeubles ou sur des poteaux en béton centrifugé. La hauteur du point lumineux au-dessus du sol est de 8 à 8,50 m.

Les lanternes de jalonnement sont fixées sur des consoles en ciment armé ayant 1 m de longueur.

Les lanternes axiales sont en général alimentées par fils aériens placés suivant l'axe de la voie. Les appareils sont raccordés alternativement sur les deux ponts d'une distribution 3 fils (un neutre et deux fils de phase) ce qui permet de réduire l'éclairage de moitié à partir de minuit.

L'allumage et l'extinction des foyers sont faits au moyen d'appareils S.A.T.A.

#### 4° BANLIEUE OUEST (*Réseau de l'Ouest-Parisien*)

Le réseau de l'Ouest-Lumière continue à installer plus de candélabres que d'appareils à suspension axiale. En effet, les 254 foyers mis en service en 1928 et correspondant à 175 km de voies éclairées, se décomposent en :

- 113 foyers sur candélabres,
- 103 foyers sur consoles,
- 38 foyers à suspension axiale.

Il y a lieu de noter que ces appareils à suspension axiale comprennent un treuil pour le déplacement de la lanterne, dispositif qui est de moins en moins répandu.

Les puissances des foyers installés sont en général assez élevées, on trouve :

|                                        |         |
|----------------------------------------|---------|
| 137 foyers équipés avec lampe de 500 W |         |
| 1                                      | — 300 W |
| 8                                      | — 150 W |
| 92                                     | — 75 W  |
| 16                                     | — 60 W  |

Des études pour alimentation de foyers à grande puissance par transformateurs individuels placés en dérivation sur des canalisations à 3 000 V ont été effectuées au cours de l'année 1928. On a également cherché à utiliser, sur ces réseaux spéciaux, des lampes à deux fila-

ments. La réalisation pratique de ces installations alimentées à haute tension, permettrait, dans la suite, de réduire dans bien des cas d'une façon sensible, les frais de premier établissement des installations d'éclairage public.

#### IV. — SITUATION ET EXTENSION DE L'ÉCLAIRAGE PUBLIC EN PROVINCE EN 1928

Ce sujet est trop vaste et trop complexe pour être traité en détail dans l'étude que nous avons entreprise.

Toutefois, nous avons estimé que ce motif ne devait pas nous empêcher de compléter les renseignements que nous avons donnés ci-dessus sur l'éclairage de Paris et de sa banlieue, en traitant la question partiellement et en nous contentant, d'une part, d'indiquer les caractéristiques essentielles d'un certain nombre d'installations existantes ou projetées et, d'autre part, de signaler les localités dans lesquelles l'éclairage électrique ne s'était pas encore développé.

Nous avons pensé également qu'il ne fallait pas seulement nous limiter aux Villes principales et, dans ce but, nous avons intercalé, chaque fois que cela nous a été possible, la description d'installations d'éclairage électrique réalisées dans les communes rurales.

Nous avons résumé ces renseignements dans un tableau n° 5 permettant au lecteur qui ne disposerait que de peu de temps, mais qui désirerait cependant avoir une connaissance suffisante du sujet, de passer dans une première lecture les descriptions plus détaillées visées ci-dessus.

*Ville de Marseille.* — Dans cette Ville, comme dans les agglomérations avoisinantes, toutes les lampes à gaz et à schiste ont été supprimées et remplacées par des lampes électriques.

Les travaux, commencés en 1922, ont permis d'inaugurer l'éclairage axial de l'avenue du Prado à l'occasion de l'Exposition Coloniale.

Actuellement, Marseille est la Ville de France où il y a le plus grand nombre de foyers électriques installés (Paris conserve la première place pour la puissance installée) environ 18 000 dont 546 sur candélabres et le reste avec suspensions axiales type Compagnie Provençale d'Entreprises.

3 489 de ces foyers correspondant à 90 km de voies ont été installées en 1928.

Les premières lampes installées étaient raccordées directement sur le réseau aérien et commandées par des allumeurs extincteurs automatiques.

Pour éviter les inconvénients présentés par ce système, on a installé, par la suite, des départs directs d'éclairage public sur transformateurs, de façon à rendre le réseau d'éclairage public complètement indépendant du réseau desservant les abonnés.

En ce qui concerne le centre de la Ville alimenté par du courant continu, les postes d'allumage furent raccordés sur les branchements existants au moment de la transformation, ce qui permet d'avoir le secours d'une batterie d'accumulateurs en cas de besoin.

En 1926, après divers essais, ces derniers postes d'allumage furent munis d'appareil à commande à distance par courant haute fréquence de la Société l'Action à distance.

Les essais effectués avec ces appareils ayant été concluants, le remplacement des appareils automatiques à réglage astronomique a même été envisagé.

Cette modification a jusqu'à présent été tenue en suspens à cause des frais élevés que nécessite cette transformation dont le principe a été admis.

*Ville de Lille.* — L'éclairage public est encore assuré principalement par des appareils au gaz, l'éclairage électrique ne faisant que renforcer ces derniers dans les principales rues.

Le nombre de lampes en service, qui ne s'est que légèrement accru durant ces dernières années, est inférieur à 500.

Les lampes sont supportées par des candélabres ou des consoles.

Les circuits d'éclairage public sont alimentés par un certain nombre de branchements desservant chacun un groupe de lampes.

L'allumage et l'extinction, qui étaient faits à la main jusqu'à ces derniers temps, sont actuellement commandés par minuterie, une même minuterie commandant, au moyen de relais, plusieurs groupes de lampes.

*Ville de Strasbourg.* — Il y a environ 600 foyers installés dans cette Ville.

L'alimentation se fait, en général, par câbles souterrains branchés directement sur le réseau de distribution et chaque foyer est commandé par un interrupteur individuel.

Dans les artères principales, l'éclairage axial est utilisé ; dans les rues moins importantes, les foyers, installés avant la guerre, sont montés sur candélabres en tube d'acier. Il y a également une quinzaine de candélabres Saunier-Duval, modèle Arts Décoratifs, installés pour l'éclairage de ponts et de places.

Pour les nouvelles installations, on a adopté l'éclairage axial avec alimentation aérienne en câbles nus (système de la Compagnie Provençale de Marseille).

L'alimentation se fait par groupes de lampes et le câble souterrain d'alimentation est branché sur le poste transformateur le plus proche.

Les lampes employées sont du type normal à incandescence en atmosphère gazeuse ; leur puissance varie suivant le cas entre 200 et 1 000 W.

Pour les foyers intensifs, les armatures utilisées sont entièrement en cuivre et munies de réfracteurs Holophane (construction éclairage technique, Nancy). Il y a également en service des armatures en cuivre avec réflecteurs en verre argenté (construction Grimmeisen).

Le service d'allumage et d'extinction est encore fait à la main.

Les nouvelles installations seront munies d'interrupteurs automatiques commandés par des horloges à cadran astronomique (système Ateliers Electro-Mécanique, Bischeim-Strasbourg).

En 1928, il a été installé 110 foyers correspondant à environ 3 km de voies éclairées (environ 18 pour cent de progression).

*Ville de Grenoble.* — L'éclairage électrique des 117 km de voies principales de Grenoble et de sa banlieue est réalisé entièrement depuis 1905.

Il y a actuellement 1 841 foyers en service, dont 28 ont été installés dans la banlieue en 1928.

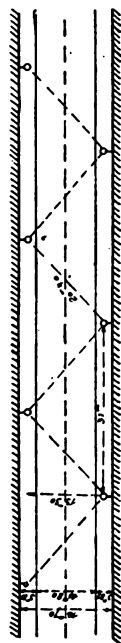
Ces 1841 foyers se répartissent comme il est indiqué ci-dessous :

|     |           |      |                 |
|-----|-----------|------|-----------------|
| 965 | lampes de | 25 W | (type monowatt) |
| 185 | —         | 50 W | (type 1/2 watt) |
| 348 | —         | 75   | —               |
| 42  | —         | 100  | —               |

## ECLAIRAGE PUBLIC

FIG 42

RUE SAINT DIZIER



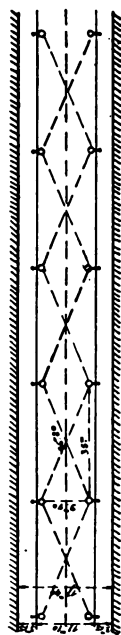
NATURE DU FOYER LUMINEUX : Lampes à incandescence à 2 filaments  
 INTENSITE LUMINEUSE : 500 à 1000 [Candela (Candela)]  
 HAUTEUR DU FOYER LUMINEUX AU DESSUS DU SOL : 5-30

| Hauteur du relevé | Eclairage                                              | Valeur de l'éclairage<br>Maximum<br>Lux | Valeur de l'éclairage<br>Minimum<br>Lux | Circulation         |
|-------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| 40° à 45°         | Eclairage complet sans<br>diffusion de lumière directe | 4.5 à 5.5                               | 2.1 à 2.5                               | Circulation lente   |
| 21° à 22°         | Eclairage complet sans<br>diffusion de lumière         | 2.2 à 2.5                               | 1.0 à 1.4                               | Circulation moyenne |
| 0° à 1°           | Eclairage complet sans<br>diffusion de lumière         | 0.5 à 0.8                               | 0.42 à 0.5                              | Circulation faible  |

NOTA : On obtient un résultat satisfaisant avec une intensité de 100 à 150 dans les rues étroites et une intensité de 200 à 300 dans les rues larges.

FIG 43

RUE SAINT JEAN



NATURE DU FOYER LUMINEUX : Lampes à incandescence  
 INTENSITE LUMINEUSE : 600 à 1000 [Candela (Candela)]  
 HAUTEUR DU FOYER LUMINEUX AU DESSUS DU SOL : 5-30

| Hauteur du relevé | Eclairage                                              | Valeur de l'éclairage<br>Maximum<br>Lux | Valeur de l'éclairage<br>Minimum<br>Lux | Circulation         |
|-------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| 40° à 45°         | Eclairage complet sans<br>diffusion de lumière directe | 5.2 à 6                                 | 2.5 à 2.7                               | Circulation lente   |
| 21° à 22°         | Eclairage complet sans<br>diffusion de lumière         | 3.6 à 4                                 | 1.4 à 1.5                               | Circulation moyenne |
| 0° à 1°           | Eclairage complet sans<br>diffusion de lumière         | 2.5 à 2.7                               | 1.0 à 1.2                               | Circulation faible  |

|     |   |     |   |
|-----|---|-----|---|
| 120 | — | 150 | — |
| 41  | — | 200 | — |
| 68  | — | 300 | — |
| 53  | — | 400 | — |
| 19  | — | 500 | — |

Les supports employés sont suivant les cas :

Des candélabres à gaz transformés : 445 ;

• Des lanternes sur consoles : 980 ;

Des candélabres Val d'Osne : 160 H. 5,50 m ;

Des consoles Val d'Osne : 25 ;

Des suspensions axiales : 87 H. 10 m ;

Des suspensions axiales : 135 H. 6 m ;

Des pylones modèles V. D. G. : 5 H. 10 m.

Le réseau d'éclairage public est nettement séparé du réseau de distribution, éclairage particulier.

Les foyers sont commandés au moyen d'appareils allumeurs-extincteurs automatiques type Novitas (environ 70) et type Landis et Gyr (8 environ).

Les lanternes à suspension axiale sont fixes et portées par un fil d'acier, type hauban de tramway de 50/10° de millimètres de diamètre.

Le remplacement des lampes est fait à l'aide d'une échelle sur roues, à la suite d'accidents survenus du fait de l'emploi de treuil et de câble d'acier.

Terminons en signalant qu'en 1928 l'énergie électrique consommée pour assurer le service d'éclairage public a été de 435 000 kWh.

*Ville de Montpellier.* — Jusqu'à présent, l'éclairage public électrique à Montpellier est limité à quelques places et artères importantes.

Au 31 décembre 1928, 78 foyers étaient installés, 73 de 300 W et 5 de 200 W.

Les supports utilisés sont principalement des candélabres en fonte (hauteur du foyer lumineux au-dessus du sol de 5,50 m) et quelques consoles.

En 1928, il n'a été installé que 24 lampes de 60 W à la périphérie de la Ville pour éclairer quelques chemins où il n'y a pas de canalisation de gaz.

Actuellement, la Ville de Montpellier a décidé de substituer progressivement l'électricité au gaz pour l'éclairage public.



Le programme adopté est le suivant :

Une première tranche de travaux à réaliser en 1929, consistera à installer un éclairage intensif dans les voies principales qui en sont dépourvues, ce qui conduira à installer 160 lampes de 300 à 500 W sur une longueur approximative de 7 km.

La moitié environ de ces lampes seront placées dans des suspensions axiales, les autres sur des candélabres ou sur des consoles.

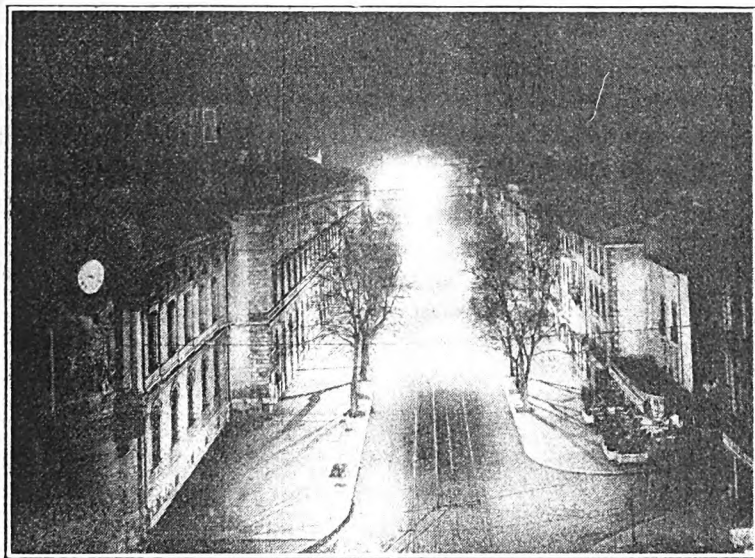


Fig. 44.

L'extension de l'éclairage électrique à l'ensemble de la Ville sera poursuivie au cours des années 1930 et suivantes.

*Ville de Nancy.* — Les installations d'éclairage public de cette Ville, commencées en 1898, comprennent actuellement 764 lampes à incandescence dont l'intensité est comprise entre 50 et 1 000 bougies. Quarante-trois de ces lampes sont à deux filaments du calibre de 500/150.

Le courant utilisé est, soit du courant continu sous la tension de 220 V, soit du courant alternatif sous la tension de 115 volts à 50 périodes par seconde.

Les 766 lampes se classent au point de vue de leurs supports de la façon suivante :

12 sur candélabres surmontés de lanternes vitrées spéciales.

28 sur consoles en fer forgé scellées dans les façades des bâtiments de la Place Stanislas, avec lanternes vitres spéciales.

150 sur candélabres à crosse simple.

188 sur consoles à scellement.

248 sur consoles fixées à des poteaux de trolley.

36 sur candélabres à lyres.

50 sur suspensions axiales des allées de Promenade de la Pépinière.

54 installées de diverses façons.

Les voies éclairées ont une longueur totale de 13,550 km.

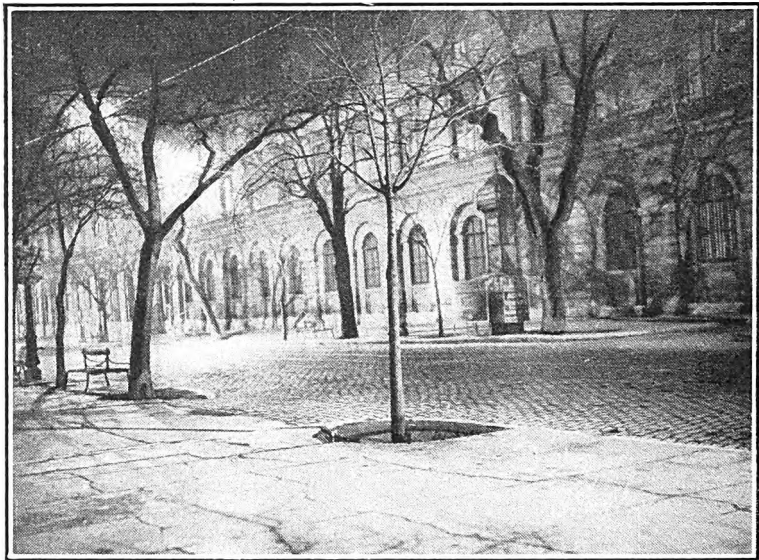


Fig. 45.

La hauteur des points lumineux au-dessus du sol est en moyenne de 5,30 m.

L'éclairage est intensif jusqu'à 1 heure du matin, la puissance correspondante absorbée est de 143 kW.

Après 1 heure du matin, l'éclairage est réduit et la puissance absorbée est alors de 56 kW.

La dépense annuelle est d'environ 420 000 kWh. Les différentes installations ont été presque toutes réalisées avant la guerre, 50 lampes nouvelles ont été installées en 1922.

Les 766 installées sont desservies par 25 postes d'allumage, dont 19 sont munis d'appareils allumeurs-extincteurs à remontage et à réglage à la main.

Les appareils automatiques sont doublés d'appareils à main permettant l'allumage et l'extinction en cas d'arrêt des appareils automatiques.

Les différents foyers lumineux sont munis de diffuseurs en tôle émaillée, forme abat-jour, renversé, que l'on nettoie 4 fois par an.

Aucun des foyers ne possède de globe et toutes les lampes sont disposées le culot en haut.

Dans les premières installations réalisées, les lampes sont disposées

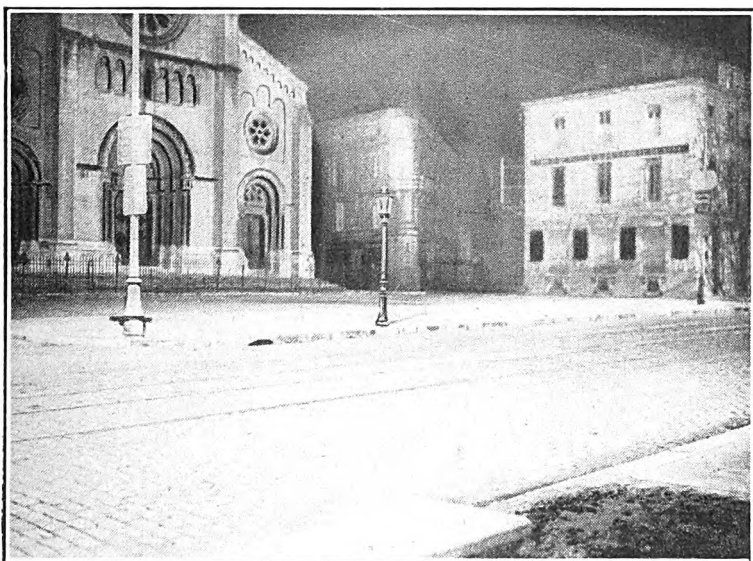


Fig. 46.

vis-à-vis l'une de l'autre de chaque côté de la rue à une distance de 40 m comptée suivant l'axe de la rue.

Dans les installations plus récentes, les lampes sont placées en quinconce à des distances de 40 à 18 m (mesurée de la même façon que ci-dessus).

Le tableau ci-joint (fig. 42, 43) donne les valeurs des éclairagements au sol obtenus rue Saint-Dizier et rue Saint-Jean.

*Ville de Nîmes.* — Jusqu'en 1928, l'éclairage public à Nîmes était assuré par environ 1 850 candélabres à gaz et une quinzaine seulement de candélabres électriques.

Actuellement, l'éclairage électrique a remplacé l'éclairage au gaz et 250 suspensions axiales (type Compagnie Provençale d'Entreprises) ont été installées en 1928.

L'ensemble des voies électrifiées représente un développement de 10 km et, lorsque l'installation sera achevée, il y aura 15 km de voies électrifiées comportant 400 suspensions.

Les fig. 44, 45 et 46 représentent les photographies de nuit du boulevard Victor-Hugo et de la place Saint-Paul éclairés par lampes de 500 W (écartement moyen 40 m, hauteur 9 m).

*Le Havre.* — Jusqu'en 1921, l'éclairage public de la Ville du Havre était presque entièrement assuré par des foyers au gaz, quelques artères seulement comportaient un éclairage d'apport par lampes à arc.

En 1921, 800 nouvelles lampes électriques ont été installées et au 31 décembre 1928 il y en avait 1 589 en service.

|                              |
|------------------------------|
| 12 lampes de 2 000 bougies,  |
| 383 lampes de 1 000 bougies, |
| 639 lampes de 600 bougies,   |
| 73 lampes de 400 bougies,    |
| 455 lampes de 300 bougies,   |
| 18 lampes de 200 bougies,    |
| 9 lampes de 100 bougies.     |

Ces lampes, suivant les voies à éclairer, sont placées sur des candélabres, des consoles murales ou dans des appareils à suspension axiale.

La répartition est la suivante :

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Candélabres .....       | 614 lampes |
| Consoles .....          | 853 —      |
| Suspension axiale ..... | 122 —      |

En 1928, l'éclairage au gaz a été entièrement supprimé dans deux quartiers où, seul, l'éclairage électrique a été maintenu.

Dans ces quartiers, il a été fait emploi, chaque fois que cela était possible, d'appareils à suspension axiale avec réflecteurs Holophane.

#### *Secteur des Forces motrices du Haut-Rhin*

##### *a) Villes d'importance secondaire et Villages :*

Dans ces localités on utilise des lampes de 75 à 200 W avec réflecteurs en tôle émaillée, munis dans certains cas d'écrans diffusants en verre dépoli.

Ces appareils sont, soit suspendus à un câble traversant la route, soit fixés à une applique sur les poteaux de bois de la distribution.

Les appareils sont espacés de 60 m environ, le foyer lumineux étant à une hauteur de 6 m.

Les suspensions axiales utilisées comportent un treuil permettant la descente de l'appareil. Quand il est nécessaire d'avoir un éclairage normal et un éclairage réduit, il est fait usage de réflecteurs en tôle émaillée à deux lampes, de préférence aux lampes à deux filaments.

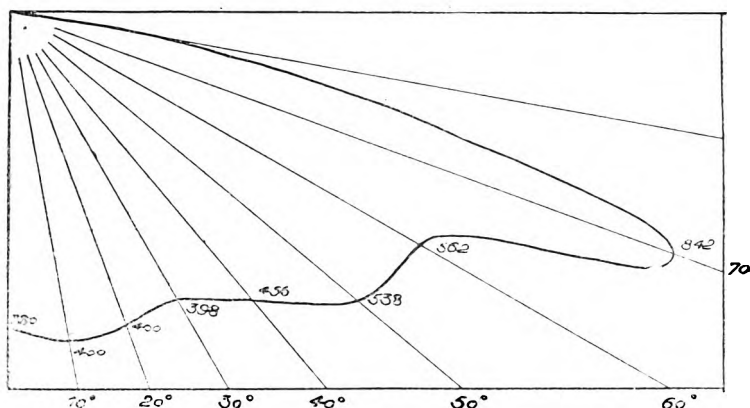


Fig. 47.

## RÉSULTATS

1° Lampe nue de 110 V  
filament en W

$I^{\circ} = 332$  bd  
 $I_{\odot} = 374$  bd  
 $I_{\ominus} = 352$  bd  
 $I_M = 412$  bd  
 $\Phi_{\odot} = 440$  lumens

2° Avec réflecteur en cristal  
argenté sans globe

$I^{\circ} = 0$  bd  
 $I_{\odot} = 449$  bd  
 $I_{\ominus} = 224$  bd  
 $I_M = 842$  bd  
 Augmentation de  $I^{\circ}_{\odot}$  (Rendement)  
 20 pour cent

car les inconvénients qui résultent d'une répartition moins régulière ont moins d'importance dans ces petites agglomérations que dans une grande Ville.

Les lampes sont branchées sur un circuit aérien spécial commandé généralement par un allumeur extincteur horaire à cadran astronomique. Le courant d'alimentation est du courant alternatif distribué sous la tension de 220 V.

b) *Ville de Mulhouse.* — Les systèmes adoptés pour Mulhouse sont différents de ceux qui viennent d'être décrits.

Dans les rues principales, on utilise des réflecteurs en verre argenté (Novus de Grimmeisen) équipés avec des lampes de 300 W et de 500 W. La fig. 47 représente la courbe photométrique de cet appareil équipé avec lampe de 4 400 lux.

Ces appareils sont placés à 30 ou 40 m les uns des autres.

Dans les voies très importantes, on a installé des foyers de 750 à 1 000 W avec réfracteur Holophane à globe fermé.

Dans les rues secondaires, on utilise d'anciens modèles de réflecteurs en tôle émaillée, équipés avec des lampes de 200 à 300 W. L'écart entre chaque appareil est de 30 à 50 m et la hauteur du point lumineux au-dessus du sol est de 8 m.

Chaque fois que cela a été possible, il a été fait emploi de suspensions axiales ; dans tous les autres cas on a employé des candélabres.

Tous les appareils (sauf les appliques des veilleuses placées à faible hauteur, 4,50 m) peuvent être descendus au moyen de treuil fixé sur les maisons ou placé dans les candélabres.

Les appareils situés au-dessus des fils de trolley sont placés sur un chariot permettant de ramener la lampe sur l'un des côtés de la rue.

Cette disposition, coûteuse et peu esthétique, tend d'ailleurs à disparaître, car on peut, avec des précautions spéciales descendre la lampe entre les fils de trolley.

L'alimentation est faite, soit par lignes aériennes en fil isolé fixé aux façades (disposition en voie de disparaître), soit par câble souterrain à 110 V et 220 V.

Chaque branchement, alimentant un groupe d'une dizaine de lampes environ, aboutit à un interrupteur placé dans une boîte raccordée sur le réseau général de distribution et placé autant que possible entre deux groupes de lampes ou aux carrefours.

Plusieurs interrupteurs sont placés dans la même boîte et les manœuvres d'allumage et d'extinction sont ainsi simplifiées.

Jusqu'à ce jour, l'allumage et l'extinction ont été effectués par le personnel d'entretien qui est en nombre suffisant, aussi aucun interrupteur horaire n'a été installé.

A partir de 23 h. 30, l'allumage est réduit et est assuré, soit par des appliques séparées, soit par des lampes à deux filaments à 220 V.

Pour les prochaines installations, destinées à remplacer l'éclairage au gaz dans certaines artères, on utilisera la suspension axiale avec alimentation des foyers par ligne aérienne en cuivre nu suivant l'axe de la rue.

La puissance installée actuellement à Mulhouse est d'environ 120 kW, non compris les veilleuses. La longueur de voies éclairées est approximativement de 12 km. La puissance installée et la longueur de voies éclairées ont augmenté d'environ 10 pour cent en 1928.

| EXERCICES             | ÉCLAIRAGE        |              |
|-----------------------|------------------|--------------|
|                       | nombre de lampes | augmentation |
| Au 30 juin 1909 ..... | 4 163            |              |
| — — 1910 .....        | 4 797            | 634          |
| — — 1911 .....        | 6 247            | 1 450        |
| — — 1912 .....        | 7 368            | 1 121        |
| — — 1913 .....        | 7 328            | 160          |
| — — 1914 .....        | 8 585            | 767          |
| — — 1915 .....        | 8 752            | 167          |
| — — 1916 .....        | 9 008            | 256          |
| — — 1917 .....        | 9 188            | 180          |
| — — 1918 .....        | 9 260            | 72           |
| — — 1919 .....        | 9 616            | 356          |
| — — 1920 .....        | 9 696            | 80           |
| — — 1921 .....        | 9 803            | 107          |
| — — 1922 .....        | 10 881           | 1 078        |
| — — 1923 .....        | 11 545           | 664          |
| — — 1924 .....        | 12 112           | 567          |
| — — 1925 .....        | 13 340           | 1 228        |
| — — 1926 .....        | 14 288           | 948          |
| — — 1927 .....        | 14 629           | 341          |
| — — 1928 .....        | 15 436           | 807          |

### *Réseau du Sud électrique*

Ce réseau alimente les communes rurales des départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse et des Bouches-du-Rhône.

La distribution dans les Villes importantes est assurée par d'autres Sociétés. Le tableau ci-dessus montre les progressions du nombre de foyers installés :

Les 15 436 lampes en service en 1928 représentent 324 262 bougies et assurent l'éclairage public dans 282 communes rurales des départements sus-visés pour une population de 318 858 habitants.

Dans toutes ces communes, l'éclairage axial n'a pas encore été utilisé. Les appareils employés sont des diffuseurs n° 2624 de la maison Pétrier-Tissot, de Lyon, supportés par des consoles n° 2734 ou 2735 construites par la même Maison

Ces consoles sont fixées sur la façade des immeubles ou sur des poteaux bois installés en bordure de la Voie publique.

Le réseau de distribution comporte un fil spécial pour l'éclairage public dit « fil Municipal » ; les lampes sont raccordées au réseau par deux fils aériens.

L'allumage et l'extinction sont en général assurés par un allumeur-extincteur placé dans le poste d'allumage.

*Ville d'Aix-les-Bains.* — Depuis 1920, l'éclairage public est assuré uniquement par l'électricité.

Pour le centre de la Ville, on a adopté en principe la suspension axiale. Les câbles porteurs de ces appareils sont fixés aux immeubles et, quand cela n'est pas possible, à des poteaux en béton centrifugé munis d'une embase en fonte.

En hiver, les suspensions sont munies de lampes de 100 bougies et en saison, de lampes de 600 bougies.

Dans les hameaux de la périphérie, l'éclairage est assuré par des lampes de 50 bougies ou de 16 bougies montées sur col de cygne, avec diffuseur en aluminium.

Les lampes d'éclairage public sont branchées sous 120 V entre phase et neutre du réseau de distribution.

Les foyers sont commandés par allumeurs-extincteurs automatiques et par contacteurs ou à la main.

En 1927, il existait :

176 lampes de 600 bougies montées sur suspensions axiales,

244 lampes de 50 bougies,

221 lampes de 16 bougies.

En 1928, il a été installé :

32 lampes de 600 bougies,

42 lampes de 50 bougies,

10 lampes de 16 bougies.



*Ville de Lorient.* — Le nombre de foyers installés est de 751 ; la longueur totale des voies éclairées est de 52 550 m.

Les lampes employées sont du type normal, à atmosphère gazeuse de 100, 200, 300, 500 W suivant l'importance des voies à éclairer.

Les appareils utilisés sont des lanternes de fabrication Grimmeisen.

Les lampes sont installées, soit sur des candélabres en fonte, type Saunier-Duval à double crosse, à console ou à lyre, soit sur des poteaux métalliques tubulaires avec console métallique, soit sur des poteaux béton avec console béton type Desaulty.

Les points lumineux sont placés à 7 m au-dessus du sol.

L'alimentation est faite par courant alternatif à la tension de 125 V, au moyen de deux fils supplémentaires ajoutés au réseau urbain, l'un pour l'éclairage permanent, l'autre pour l'éclairage temporaire. Les lampes sont branchées entre l'un de ces fils et le neutre du réseau.

L'allumage et l'extinction sont assurés par des interrupteurs automatiques système Garnier.

En 1928, il n'y a eu ni travaux ni étude nouvelle.

#### *Compagnie d'Electricité de Limoges*

a) *Ville de Limoges.* — Dans cette ville, les foyers qui assurent l'éclairage public sont alimentés, soit par l'électricité, soit par le gaz.

Au 1<sup>er</sup> janvier 1928, 390 foyers électriques étaient installés.

Jusqu'à fin 1927, les lampes étaient placées dans des lanternes supportées par des candélabres type Ville de Paris de la maison Saunier-Duval ou par des consoles scellées sur les immeubles.

La hauteur des foyers au-dessus du sol est de 5,50 m.

En 1928, il a été décidé de compléter cet éclairage et de porter le nombre des lampes installées à environ 1 100 et d'utiliser la suspension axiale type Compagnie Provençale d'Entreprises pour les principales voies.

Cette installation, qui comprend 470 lampes de 600 bougies, a été terminée vers fin avril 1929.

La hauteur au-dessus du sol prévue pour les foyers lumineux oscille entre 8 et 9 m ; la distance entre les foyers est en moyenne de 45 m.

La longueur totale des voies éclairées est d'environ 160 km dont 21 avec suspension axiale.

Les appareils placés sur candélabres ou sur consoles, sont alimentés, soit par des canalisations souterraines, soit par des canalisations aériennes.

L'allumage et l'extinction des foyers desservis par des canalisations souterraines, sont assurés par un allumeur-extincteur automatique à cadran astronomique placé dans chaque pied de candélabre.

A la périphérie, où se trouvent les appareils desservis par des canalisations aériennes, un interrupteur automatique du même type assure l'allumage et l'extinction de groupes de deux à cinq lampes.

Les suspensions axiales sont alimentées par des lignes aériennes à 3 fils placées dans l'axe des rues et supportées par les câbles tendeurs qui soutiennent les lanternes.

Ces lignes aériennes constituent des réseaux d'éclairage public qui sont commandés par des interrupteurs placés dans les postes de transformateurs. Chacun d'eux, suivant les emplacements, assure l'allumage et l'extinction de groupes de 20 à 60 lampes.

b) *Autres communes (Saint-Yrieix-la-Perche, Lubersac et autres petites agglomérations).* — En principe, dans ces communes, l'éclairage public est assuré par des lampes de 100 bougies 1/2 Watt placées dans des lanternes avec diffuseurs à feu nu vissés à l'extrémité de consoles en tube fer scellées sur les immeubles ou fixées sur les poteaux d'éclairage public

En particulier, l'éclairage de Saint-Yrieix, commune de moyenne importance, est assuré par 143 lampes correspondant à une longueur de voies d'environ 10 km.

Dans ces communes, la distribution est faite par canalisations aériennes auxquelles est ajouté le fil d'allumage et d'extinction de l'éclairage public.

Il y a un allumeur extincteur à remontage automatique et à cadran astronomique par poste de transformation.

Ces appareils sont fournis par la Compagnie des Compteurs représentant de la S.A.I.A.

Pour toutes ces installations, l'allumage a lieu 1/2 heure après le coucher du soleil et l'extinction 1/2 heure avant le lever.

*Compagnie d'Electricité de Brest et Extensions : Brest, Lambazellec, Saint-Marc.* — Le tableau ci-dessous indique le nombre de foyers installés dans ces localités. La longueur des réseaux d'éclairage public est de 40 km environ.

| INTENSITÉ HEURE   | 16 Bougies<br>Monowatt |                 | 32 Bougies<br>Monowatt |                 | 50 Bougies<br>Monowatt |                 | 100 Bougies<br>1/2 Watt |                 | TOTAL |
|-------------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------|
|                   | Perma-<br>nente        | Tempo-<br>raire | Perma-<br>nente        | Tempo-<br>raire | Perma-<br>nente        | Tempo-<br>raire | Perma-<br>nente         | Tempo-<br>raire |       |
| Brest .....       | 584                    | 379             |                        |                 |                        |                 | 165                     | 86              | 1214  |
| Lambazellec ..... |                        |                 | 62                     | 55              | 35                     | 36              |                         |                 | 188   |
| Saint-Marc .....  | 111                    |                 |                        |                 |                        |                 |                         |                 | 111   |
|                   | 1074                   |                 | 117                    |                 | 71                     |                 | 251                     |                 | 1513  |

La durée d'allumage est la suivante :

Permanente : 3 848 h 1/4 ;

Temporaire : 2 333 h 3/4.

Les supports d'appareils les plus usités sont les suivants :

Candélabres, type, Durenne, n° 888.

Consoles murales Durenne n° 1210 saillie un mètre.

On n'a pas utilisé l'éclairage axial.

L'énergie est distribuée par 4 fils sous forme de courant triphasé sous la tension 110/190 volts.

Les lampes sont commandées par des allumeurs-extincteurs du type Novitas Opus.

*Ville d'Avignon.* — L'éclairage électrique a été réalisé en utilisant les anciens candélabres à gaz après les avoir modifiés en ajoutant une crosse au fût existant.

Le nombre des lampes installées au 31 décembre 1928 était de 1 328, en augmentation de 22 sur l'année 1927 correspondant à 50 km de voies éclairées.

Dans la rue principale, des candélabres du même type que ceux installés sur la Cannebière, à Marseille, sont actuellement en cours de montage. Ces appareils comporteront trois et cinq foyers lumineux.

Jusqu'ici, l'éclairage axial n'a pas été employé.

TABLEAU V. — Situation de l'éclairage public par l'électricité dans quelques villes de province en 1928.

| VILLES                              | PUISSANCE<br>en W        | SUPPORTS LAMPES                                  | HAUTEUR<br>P <sup>1</sup> L <sup>x</sup><br>en m | ESPACEMENT<br>en m | LONGUEUR<br>ÉCLAIRÉE<br>en km | COMMANDE                             | CANALISATIONS                        | APPAREILS                                                     |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Aix-les-Bains (725<br>foyers) ..... | 175 et 300               | Axiales poteau bé-<br>ton.                       |                                                  |                    |                               | automatique<br>à la main             |                                      |                                                               |
| Avignon (1 329<br>foyers) .....     | 75<br>100/200<br>300/300 | Cand. à gaz à con-<br>soles électriques.         |                                                  |                    | 50                            | automatique                          |                                      |                                                               |
| Béthune .....                       |                          |                                                  |                                                  |                    |                               |                                      |                                      |                                                               |
| Brest (1 214 foyers).               | 20 à 75                  | Cand. Durenne.<br>Consoles murales               |                                                  |                    | 40                            | Opus Novitas                         |                                      |                                                               |
| Cannes (365 foyers).                | 75 à 500                 | Axialeprovençales<br>Cand. Tub. acier.           | 9 à 10                                           |                    | 14,600                        | horaira Astro<br>Ghielmetti          |                                      | réflec. émail<br>Cie provençale<br>réflecteur mé-<br>tallique |
| Communes de l'Est<br>Lumièrè .....  | 200 à 500                | Sus. Axiale po-<br>teau C. A.                    | 9,30                                             |                    | 29<br>15                      | Ghielmetti<br>Astro                  | aérienne                             |                                                               |
| Communes de<br>l'Ouest Lumièrè..    | 600 à 500                | Candél. Consoles<br>susp. Ax. treuil.            |                                                  | 40                 |                               |                                      | aérienne                             | Holo 4 433                                                    |
| Communes de Nord<br>Lumièrè .....   | 500<br>100/200           | Cand. béton armé<br>consoles bét. armé           | 6,50<br>6,50                                     | 70 à 80            |                               |                                      | souterraine                          | Grimmeisen                                                    |
| Communes du Sud<br>Lumièrè .....    | 100 à 500                | Susp. ordinaire.                                 | 8 à 8,50<br>6 à 7,50                             | 40<br>50           | 128                           | S.A.I.A.<br>à la main                | aérienne<br>(aérienne<br>souterraine | bande diffusan-<br>te verredépoli                             |
| Caen .....                          | 50 à 1000                | Candélabres susp.<br>Axiales.                    |                                                  |                    |                               | automatique                          |                                      |                                                               |
| Grenoble (1 841<br>foyers) .....    | 100/200<br>300/500       | Cand. Val d'Osne-<br>susp. axiale. Py-<br>lones. | 5,50/6<br>40                                     |                    | 117                           | type Novitas<br>» Landis<br>» et Gyr | réseau spé-<br>cial                  |                                                               |
| Le Havre (1 589<br>foyers) .....    | 75 à 1000                | Cand. consoles.<br>Susp. axiales.                |                                                  |                    |                               | Ghielmetti<br>Astro                  |                                      | Holo                                                          |
| Lille (500 foyers)...               |                          | Cand. Consoles.                                  |                                                  |                    |                               | Minuterie                            |                                      |                                                               |

| Limoges<br>(1 100 foyers)....    | 300                            | Cand. V. de P<br>Susp. axiales<br>(Consoles secl.                                                        | 5,50<br>8 à 9 | 45                 | 160 dont<br>21 axial | Int. horaire<br>remontage<br>automatique<br>S.A.I.A. | câbles sou-<br>terr. lignes<br>aériennes        | Lant. Cie pro-<br>vençale.                                |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Lorient<br>(751 foyers).....     | 400/200<br>300/500             | Cand. S. D.<br>poteaux tubul.<br>poteaux C. A.<br>suspens. axiales.<br>Suspens. axiales.<br>Candélabres. | 7             |                    | 52,500               | Int. auto Gar-<br>nier                               |                                                 | Lant. Grim-<br>meisen.                                    |
| Marseille<br>(18 933 foyers).... |                                |                                                                                                          |               | 30 à 40            | 590                  | automatique<br>action à dist.                        |                                                 |                                                           |
| Montpellier<br>(78 foyers).....  | 60 à 300                       | Candélabre fonte.<br>Consoles.                                                                           | 5,50          |                    |                      |                                                      | souterr.<br>aériennes                           | Holo.<br>Réflect. verre<br>argent.                        |
| Mulhouse.....                    | 200/300<br>300/500<br>750/1000 | Cand.<br>Susp. axiale.<br>Candélabres 50 en<br>axial.                                                    | 8             | 30 à 30<br>30 à 40 | 42                   | à la main<br>automatique<br>automatique              | aérienne<br>souterrain<br>souterr.<br>aériennes | Réflecteur tôle<br>émail.<br>Diffuseurs tôle<br>émaillée. |
| Nancy<br>(766 foyers).....       | 50 à 500                       |                                                                                                          | 5,30          | 18 à 40            | 13,500               |                                                      |                                                 | Holo.                                                     |
| Nantes<br>(1 075 foyers)....     | 100 à 500                      | Candél. S. D.                                                                                            |               | -                  | 28                   | Ghielmetti<br>Garnier astro                          |                                                 |                                                           |
| Nîmes (250 foyers).              | 300 à 750                      | Axial Cand. acier.<br>Brandt et Fouille-<br>ret. Cand. axial.<br>Pylones à con-<br>soles.                | 9             | 40                 | 10                   |                                                      |                                                 | Holo.<br>Brandt.<br>Fouilleret.                           |
| Roubaix.....                     | 300/300                        |                                                                                                          |               |                    | 4,500                |                                                      |                                                 |                                                           |
| St-Nazaire .....                 |                                |                                                                                                          |               |                    |                      |                                                      |                                                 |                                                           |
| Strasbourg<br>(600 foyers).....  | 200 à 1000                     | Axial tubes acier<br>AD. S. D.<br>Cie Provençale.                                                        |               |                    |                      | à la main                                            | câbles sou-<br>terrains                         | Holo.<br>Grimmeisen.<br>Electro Bish-<br>heim.            |

L'allumage et l'extinction sont commandés par des appareils automatiques, chaque appareil commande une centaine de lampes environ.

Les lampes utilisées sont des lampes 1/2 W de 100 bougies, sauf dans la rue principale où les lampes seront de 600 bougies.

*Ville de Cannes* — Jusqu'en novembre 1927 l'éclairage public de la Ville de Cannes était obtenu à l'aide d'appareils à gaz.

La première installation d'éclairage électrique a été mise en service en décembre 1927.

Depuis cette date, l'électrification a été effectuée progressivement et actuellement 365 lampes sont installées, savoir :

235 lampes de 500 W.

96 lampes de 300 W.

16 lampes de 100 W.

18 lampes de 75 W.

La longueur des voies éclairées est de 14,600 km

Suivants les quartiers la distribution est faite :

par courants triphasés 3 fils, tension 200 V,

par courants monophasés 3 fils,  $2 \times 115/120$  V,

par courants monophasés 2 fils, 115/120 V.

L'éclairage axial est utilisé, les lampes étant installées à demeure sur câbles porteurs ou sur des poteaux avec console de renvoi (fig. 49) sans treuil de descente.

Le matériel utilisé est celui de la Compagnie Provençale d'Entreprises : collier M.A.M. avec réflecteurs en tôle émaillée.

Les poteaux formant candélabres ont de 9 à 10 m de hauteur et sont constitués par des tubes acier des Usines de la Sarre à treints successifs, bagues et socles décoratifs en fonte avec consoles de renvoi de 4 m 50 de longueur.

Les lampes utilisées sont des lampes demi-watt de 500 W, 300 W, 100 W et 75 W.

Les foyers sont commandés par des allumeurs-extincteurs automatiques avec cadran astronomique système Ghielmetti et S.A.I.A. placés dans les divers postes de transformation desservant le réseau d'éclairage public.

*Société Nantaise*

a) *Ville de Nantes* : Le nombre de foyers électriques installés était de 1 075 au 31 décembre 1928 (dont 40 installés en 1928) ; la longueur des voies éclairées est à la même date de 24,5 km.

Les lampes utilisées sont des lampes « Métal » 1/2 Watt fonctionnant sur courant alternatif de 110 V ou continu à 220 V. Les intensités adoptées sont de 1 000, 600, 400 et 200 bougies.

Les lanternes sont munies de réfracteurs Holophane.

Les supports sont constitués par des consoles et candélabres Saurier-Duval (type demi-luxe) pour le centre de la Ville.

Les foyers sont commandés des postes d'allumage par des interrupteurs automatiques à cadran astronomique type Garnier sur le courant continu et Ghielmetti sur le courant alternatif.

b) *Concessions s'étendant sur la Loire-Inférieure et le Maine-et-Loire* : L'éclairage public est installé dans 150 Communes.

Le nombre de lampes en service dans chacune de ces localités est variable suivant leur importance et leur richesse.

Les lampes employées sont des lampes ordinaires 1/2 W ou monowatt de 100, 50, 32 bougies.

Leurs supports sont constitués en majorité par des consoles Soule, type n° 1 837, montées sur poteaux.

Quelques appareils à suspension axiale du type de la maison Auriol sont plus particulièrement employés aux carrefours.

*Ville de Caen*. — A Caen, l'éclairage public est assuré en grande partie par des appareils au gaz.

Six groupes de 4 lampes de 100 bougies sont installés boulevard des Alliés avec des suspensions axiales et deux candélabres type Durrenne avec lampes de 2 000 bougies sur la place Saint-Pierre.

Par contre, dans presque toutes les communes suburbaines, il existe actuellement un éclairage public électrique.

Pour réaliser ces installations, on a utilisé des consoles tubulaires de 0,80 m ou 1 m d'avancement avec diffuseur biconique, genre Leroy et Chauvot (n° 6432.35 C.T.).

La suspension axiale a été abandonnée.

L'allumage se fait à la main et au moyen d'interrupteurs horaires automatiques types Ghielmetti (S.A.I.A. ou Etelec).

En 1928, 152 lampes ont été installées dans 22 communes ; ce sont presque toutes des lampes 50 bougies, sauf aux carrefours où l'on a utilisé des lampes de 100 bougies.

*Ville de Roubaix.* — Les installations d'éclairage public par l'électricité de cette grande ville sont encore à l'état embryonnaire.

Le nombre de kilomètres de voies éclairées est d'environ 4,350 km.

48 candélabres avec lampes de 500 W sont installés rue de la Gare, 11 Grand'Place, avec lampes de 300 W, autour des Halles et le long du boulevard de Paris, cinquante consoles équipées avec réflecteurs et lampes de 50 W sont installées.

Pour l'éclairage des deux artères principales, Grande-Rue et rue Neuve, on a utilisé des suspensions axiales avec appareils type Holographane ou Brandt et Fouilleret, munis de lampes de 200 W.

A signaler également, avenue Jean-Jaurès, une installation de consoles supportées par des pylones et équipées avec des réflecteurs et des lampes de 75 W.

Aucune installation nouvelle n'a été réalisée en 1928.

Nous limiterons à ce dernier exemple ces descriptions peut-être déjà trop nombreuses, nous réservant de les compléter l'année prochaine en examinant plus particulièrement les nombreuses installations qui sont actuellement en cours d'exécution ou qui doivent être réalisées très prochainement.

\*  
\*\*

## CONCLUSION

Les exemples que nous venons de donner et qu'il serait très facile de multiplier, indiquent une progression importante de l'éclairage public par l'électricité en France. Cette progression, qui semble très rapide lorsque l'on considère ce qui a déjà été exécuté, paraît très lente lorsque l'on envisage ce qu'il reste à faire.

Il est en effet certain que dans un avenir plus ou moins lointain, les autres modes d'éclairage public dont le développement est encore si important, devront s'incliner et disparaître devant l'électricité.

Il convient de signaler comme caractère particulier des installations nouvelles, le développement très important de l'éclairage axial. C'est ainsi que le dispositif de la Compagnie Provençale d'Entreprises, qui



est parmi ceux qui sont les plus utilisés, a servi à équiper jusqu'à ce jour environ 700 km de voies dont 110 km installés en 1928.

Les installations comportant d'autres modes de suspensions ne présentent pas dans leur ensemble de grandes modifications par rapport à celles qui ont été effectuées précédemment.

Toutefois, les études et les essais en cours font prévoir pour l'avenir immédiat une progression plus rapide et une évolution plus marquée des installations d'éclairage public en France.

\*  
\*\*

En terminant, qu'il nous soit permis de remercier ici les nombreux Ingénieurs qui ont bien voulu nous donner les renseignements dont nous avons besoin et qui nous ont été particulièrement utiles pour l'élaboration de ce rapport.

### Annexe

#### RELAIS S.T.122 POUR LA COMMANDE A DISTANCE DES CONTACTEURS PAR COURANT HAUTE FREQUENCE (Voir fig. 28, 29 et 30.)

*Description de l'appareil.* — Sous l'action du courant haute fréquence le disque d'aluminium 1 tourne, sur son axe sont montés : la roue dentée 2, la route dentée 3, l'ergot 4, le plateau 5 est fou sur l'axe, une rainure 6 est ménagée suivant un demi périmètre dans le moyeu du plateau 5 ; l'ergot 4 glissant dans cette rainure maintient le plateau sur l'axe et en assure l'entraînement ; le ressort 7 fixé en « a » sur l'axe du disque 1 et en « b » sur le plateau 5 maintient le plateau en position contre l'ergot 4, le plateau 5 porte le doigt 8.

La roue dentée 2 provoque la rotation de la roue 9, cette roue est montée folle sur l'axe, le moyeu comporte une couronne taillée à dents de loup 10, qui engrène avec une couronne semblable taillée sur la roue d'échappement 11. Pour un sens de rotation déterminé la route 11 est entraînée, elle agit sur le régulateur à ancre 12, muni du balancier 13, pour le sens de rotation inverse les dents de loup n'engrènent pas, le régulateur ne fonctionne pas.

La route dentée 3 en prise avec la roue dentée 14 provoque la rotation de l'étrier 15, cet étrier porte un axe 16 sur lequel sont calés : la roue à rochets 17; les doigts 18 et 19, le ressort 20 fixé en c sur

l'étrier et en 2 sur l'axe 16 ramène les doigts 18 et 19 dans une position déterminée lorsque la roue à rochets est libérée par le cliquet 20 sous l'action du doigt 21 rivé sur le cliquet.

L'étrier 15 en tournant arme le ressort hélicoïdal 30 dont les extrémités sont fixées en e sur l'équerre 22 solidaire du bâti et en f sur l'étrier 15, ce ressort en se détendant ramène l'appareil à sa position initiale.

L'interrupteur à mercure 23 est maintenu par la bride 24 fixée sur le levier 25, une des extrémités de ce levier est travaillée de façon à offrir des chemins de glissement aux doigts 18 ou 19 qui en tournant produisent le basculement du levier 25 et par conséquent celui de l'interrupteur à mercure.

Le ressort 31 oscillant de part et d'autre du bouton d'accrochage 29 produit la manœuvre brusque de l'interrupteur et le maintient aux positions allumage et extinction.

*Fonctionnement de l'appareil.* — L'appareil fonctionne sous l'action du courant haute fréquence envoyé suivant des émissions brèves ou longues.

*Les émissions brèves* ont pour but d'amener les doigts 18 ou 19 dans la position convenable afin que leurs trajectoires puissent rencontrer les chemins de glissement 26 ou 27.

*L'émission longue* amène les doigts 18 ou 19 en contact avec les chemins de glissement et provoque le basculement de l'interrupteur à mercure.

Le doigt 18 commande l'allumage, le doigt 19 commande l'extinction.

*Pour commander l'allumage*, il faut : 2 émissions brèves, 1 émission longue.

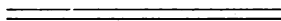
*Pour commander l'extinction* il faut : 7 émissions brèves, 1 émission longue.

*Pour une émission brève*, le disque aluminium 1 en tournant imprime à l'étrier 15 une rotation de  $1/2$  tour environ, la roue à rochets 17 est entraînée, le plateau 5 tourne en sens inverse, le doigt 8 vient en contact avec une dent de la roue à rochets et comme le doigt 8 tourne plus vite que l'étrier 15 la roue à rochets avance d'une dent en entraînant les doigts 18 et 19. Le ressort hélicoïdal 21 a été tendu

pendant ce demi-tour, à la fin de l'émission, il se déroule et il entraîne l'étrier en sens inverse ; la roue à rochets 17 rencontre le doigt 8. mais à ce moment l'ergot 4 glisse dans la rainure 6, le plateau 5 étant fou sur son axe n'oppose aucune résistance, la rotation continue librement, le doigt 8 échappe et sous l'action du ressort 7 le plateau 5 reprend sa position normale.

*Pour une émission longue*, l'étrier 15 tourne 1 tour environ, les doigts 18 et 19 avancent d'une dent en rencontrant le doigt 8 et continuant leur rotation, le doigt 18 pour l'allumage rencontre le chemin de glissement 26 et bascule l'interrupteur à mercure ; l'étrier 15 continue sa course, le doigt 21 rencontrant la butée 28 soulève le cliquet et libère la roue à rochets qui sous l'action du ressort 20 reprend sa position initiale, à la fin de l'émission longue sous l'action du ressort 21, tout défile en sens inverse et l'appareil reprend sa position de départ.

*Si une erreur a été faite* sur le nombre d'émissions brèves, les doigts 18 ou 19 n'ont pas la position nécessaire, ils ne rencontreront pas le levier 25 pendant l'émission longue, le fonctionnement de l'interrupteur n'aura pas lieu, mais à la fin de cette émission tout revient à sa position de départ, l'appareil est prêt pour de nouvelles émissions.



# LES CABLES SOUTERRAINS A HAUTE TENSION <sup>(1)</sup>

Par M. J. DELON

*Directeur général aux Câbles de Lyon*

---

*Motifs qui retardent, au point de vue de la tension d'exploitation, les câbles par rapport aux lignes aériennes. — Courbes de vie. — Pertes diélectriques. — Câbles à 60.000 V. — Câbles à 132 000 V. — Transmission de l'énergie par canalisations souterraines à très haute tension. — Considérations économiques. — Conclusions.*

L'augmentation rapide de la consommation d'énergie électrique dans les grandes agglomérations a nécessité depuis quelques années la création de super-réseaux à très haute tension dont la réalisation a marqué une étape importante dans le développement de l'industrie des câbles souterrains.

Je me propose de montrer par quels moyens les constructeurs de câbles sont arrivés à résoudre les problèmes nouveaux qui se sont ainsi posés ; nous verrons aussi quel est l'état actuel de l'industrie des câbles souterrains et comment les progrès de cette industrie sont susceptibles d'améliorer la technique de la transmission de l'énergie.

On peut être surpris de constater que l'on a construit des lignes aériennes à 150 000 volts, alors que l'on n'utilisait encore que des canalisations souterraines à 60 000 volts et que l'on pose actuellement des lignes aériennes à 220 000 volts, alors qu'il n'a été mis en service que des canalisations souterraines à 120 000 ou 130 000 volts.

Le câble souterrain est donc en retard sur la ligne aérienne et une des principales raisons qui ont provoqué ce retard est que l'on a longtemps considéré le câble souterrain comme un article de luxe qui ne pouvait être utilisé que par les Sociétés qui avaient à distribuer l'énergie dans les grandes agglomérations où la pose des lignes aériennes était pratiquement irréalisable.

Les tensions de fonctionnement de ces réseaux urbains étaient beau-

---

(1) Communication présentée en séance commune avec la Société des Ingénieurs civils de France le vendredi 26 avril 1929.

coup moins élevées que celles des lignes de transport de force, en sorte que les Ingénieurs qui étudiaient la fabrication des câbles souterrains n'étaient pas encouragés, au début de l'industrie électrique, à poursuivre la mise au point des canalisations à très haute tension, car les débouchés manquaient.

Il faut dire aussi que les progrès de cette industrie ont nécessité pour leur réalisation de grosses dépenses d'outillage, et l'on pouvait considérer comme hasardeux d'engager des capitaux pour la création de cet outillage, alors que l'on ne voyait pas encore s'ouvrir largement les débouchés.

La fabrication des câbles souterrains est, en effet, assez délicate. L'isolant que l'on utilise est constitué par du papier que l'on enroule en bandes minces autour du conducteur ; on le dessèche ensuite, en même temps qu'on le prive de l'air occlus dans la masse du papier, puis on imprègne le tout avec une matière isolante plus ou moins fluide, à base d'huile et de résine.

Cela était assez facile à réaliser lorsqu'il ne s'agissait que de fabriquer des câbles à basse ou à moyenne tension dans lesquels la contrainte que l'on imposait à l'isolant n'était que de 2 000 ou 2 500 volts par mm

Mais, lorsqu'on a voulu fabriquer des câbles à 40 000 ou 60 000 volts, il a fallu admettre dans le diélectrique des contraintes de l'ordre de 4 000 à 5 000 volts par mm, et c'est alors que l'on a constaté l'influence des traces d'air qui peuvent rester occluses dans la masse du papier.

Ces bulles d'air s'ionisent lorsque le diélectrique travaille sous un gradient de potentiel suffisamment élevé ; cette ionisation dépend, non seulement du gradient de potentiel, mais aussi du volume et de la pression des bulles gazeuses en sorte que l'on s'est demandé pendant longtemps comment il était possible de comparer les qualités des isolants de cette nature.

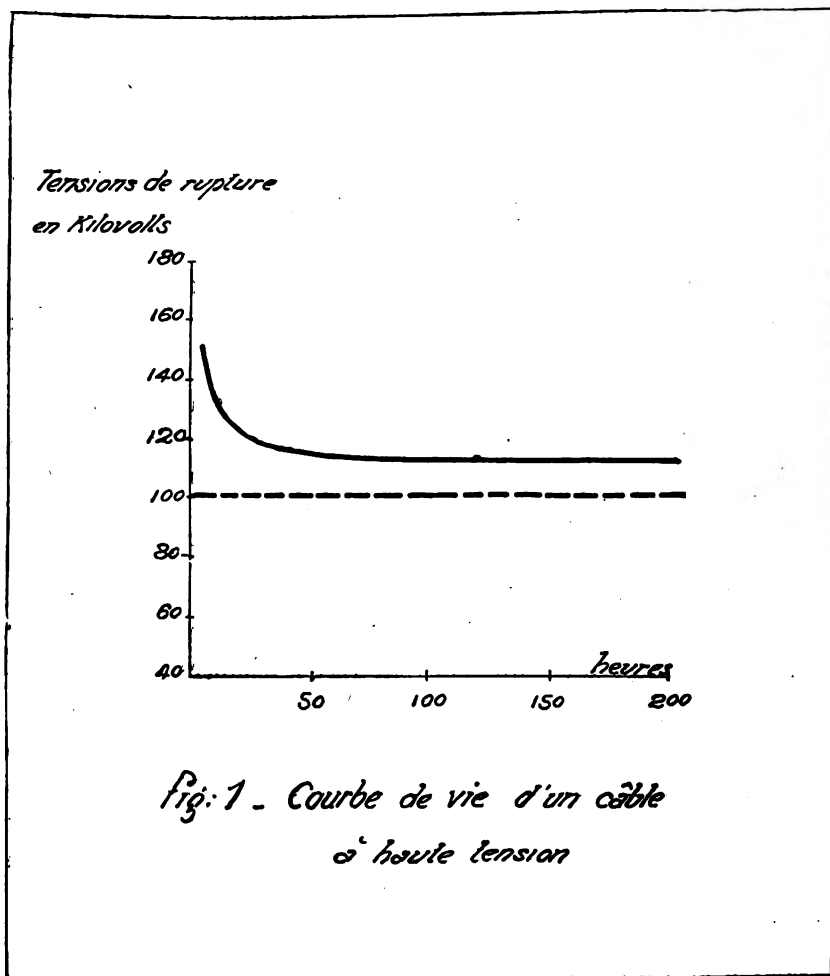
Au début de l'industrie électrique, on a commencé par comparer les isolants en mesurant leur résistance d'isolement sous des tensions continues de 100 ou 150 volts ; on a préconisé ensuite des essais de quelques minutes à 3 ou 4 fois la tension de service.

Mais il est arrivé que des câbles ayant supporté ces épreuves ne résistaient que quelques mois à la tension de service en cours d'exploitation.

### Courbes de vie

Les constructeurs ont été ainsi conduits à étudier le vieillissement de leurs isolants au moyen d'essais de très longue durée à diverses tensions.

Les résultats de ces essais se traduisent par des courbes de vie qui



*Fig. 1 - Courbe de vie d'un câble  
à haute tension*

représentent la tension de rupture du diélectrique en fonction de la durée d'application de la tension (fig. 1).

Ces courbes sont asymptotes à une parallèle à l'axe des temps et l'ordonnée de l'asymptote donne la tension limite sous laquelle le câble peut résister indéfiniment.

J'ai exposé en détail cette question des courbes de vie dans un Rapport que j'ai présenté à la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à très Haute Tension en juin 1927. On trouvera dans ce même Rapport la description d'un procédé graphique qui permet de déterminer approximativement l'ordonnée de l'asymptote.

L'application pratique de ces courbes de vie aux essais des câbles permet de prévoir par des essais en Usine, la façon dont se comportera une canalisation en cours d'exploitation.

Cependant cette méthode nécessite des essais de tension prolongés jusqu'à la rupture de l'isolant, essais qui ne peuvent être faits que sur des tronçons de câbles sacrifiés. Ce sont donc des sondages que l'on fait sur des lots de câbles fabriqués de la même manière, et l'on complète ensuite les indications que fournissent ces sondages par des essais de tension de courte durée et par des mesures de pertes dans le diélectrique que l'on fait sur toutes les longueurs.

### Pertes diélectriques

La mesure des pertes dans le diélectrique revient à comparer un câble à un condensateur sans perte. On obtient ainsi la valeur de l'angle de perte du câble, c'est-à-dire le décalage du courant qui traverse le diélectrique par rapport à la tension appliquée entre les armatures.

Les variations de cet angle, soit en fonction de la tension, soit en fonction de la température, donnent quelques indications sur la qualité moyenne du diélectrique de chaque longueur. Mais l'appréciation de cette qualité moyenne est insuffisante en raison de la présence possible de points faibles localisés aux endroits où se trouvent des défauts d'imprégnation.

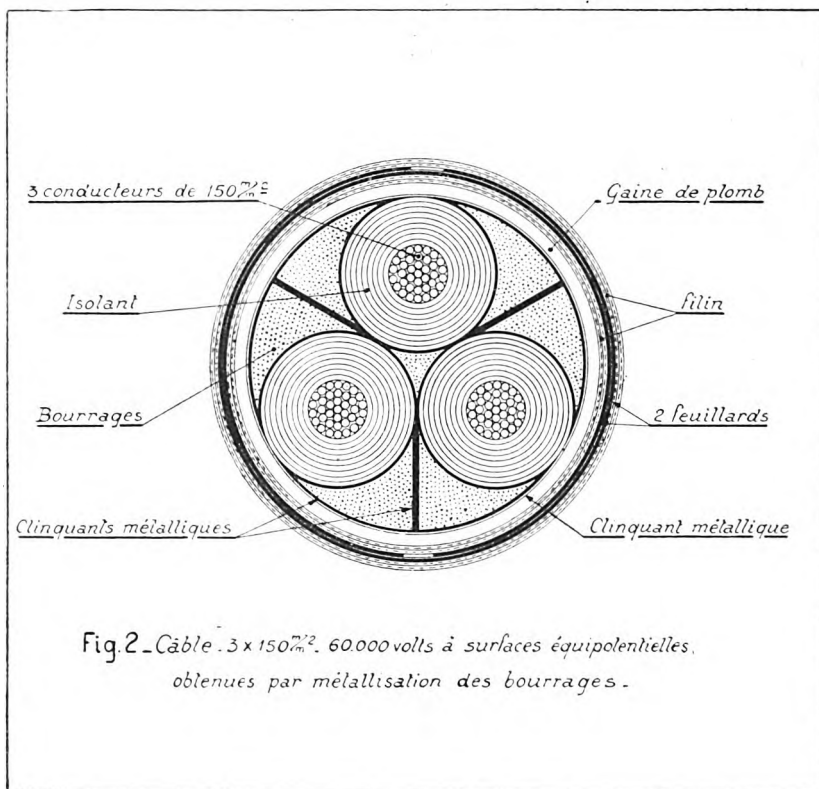
Appliquées à des longueurs de quelques mètres de câble, les mesures de pertes permettent de comparer entre elles les qualités des divers diélectriques que l'on peut fabriquer, en particulier d'éliminer certains matériaux et de perfectionner les procédés de fabrication.

### Câbles à 60 000 volts

Les procédés d'investigation dont nous venons de parler ont été mis au point pendant ces dix dernières années et ont permis de faire progresser rapidement l'industrie des câbles souterrains en sorte qu'il est actuellement possible de réaliser des canalisations souterraines susceptibles de fonctionner sous des tensions relativement élevées.

Tout d'abord, le câble triphasé du type normal, qui est constitué par trois conducteurs assemblés sous une même gaine de plomb avec des bourrages de jute entre les conducteurs, a été remplacé par le câble triphasé à surfaces équipotentiellles.

Dans ce type de câble (fig. 2), le champ tournant elliptique dont la direction était, à certains moments de la période, oblique ou paral-

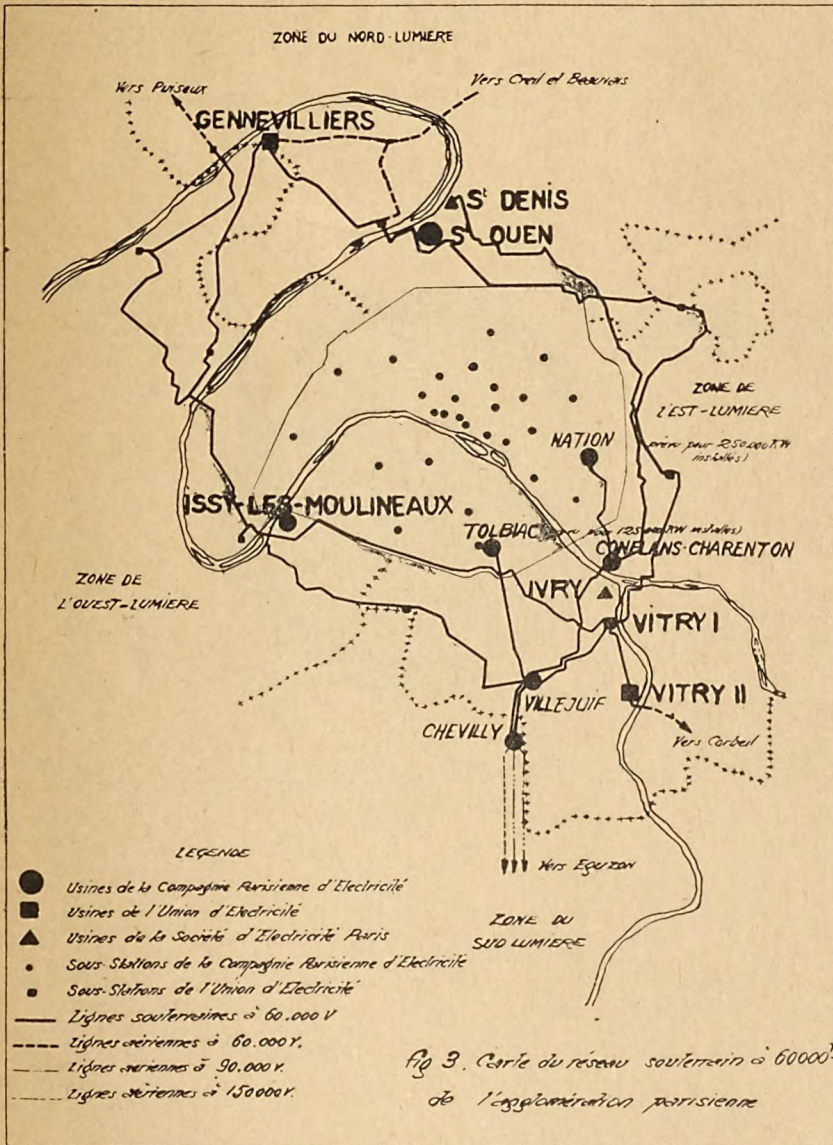


lèle aux couches de papier est remplacé par un champ radial, en sorte que l'isolant n'est plus soumis aux effets destructifs des efforts tangentiellls.

En même temps que ce dispositif permet une meilleure répartition du champ électrique, il a l'avantage de favoriser l'évacuation de la chaleur pendant le fonctionnement du câble, en sorte que l'intensité admissible et par suite la capacité de transport des câbles à surfaces équipotentiellles sont supérieures de 20 à 25 pour cent à celles des câbles du type normal.



Des câbles de ce modèle peuvent être réalisés pour toutes les tensions pour lesquelles les câbles triphasés ont été établis.

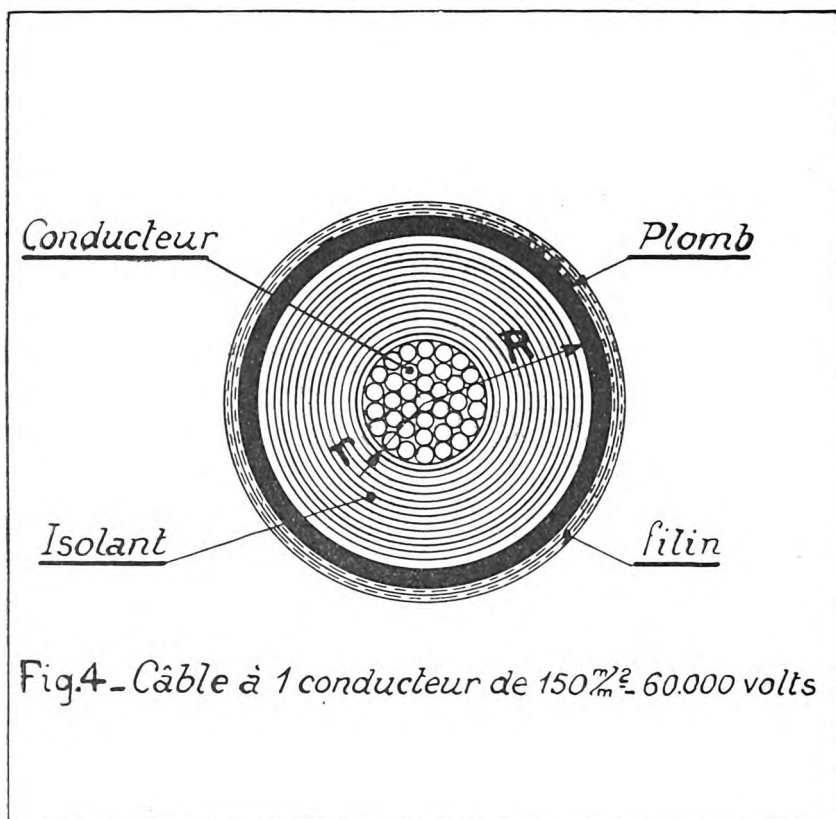


Leur limite d'emploi dépend uniquement du diamètre que l'on atteint et du poids du câble.

Toutefois, pour des tensions supérieures à 60 000 volts, le diamètre et le poids rendent la manipulation de ces câbles difficile, et il est

à prévoir que, pour des tensions plus élevées, on sera conduit à adopter uniquement le système de canalisation formé par trois câbles à un conducteur, comme cela a déjà été fait pour la presque totalité des canalisations à 60 000 volts qui ont été posées à Paris :

Il existe, en effet, autour de Paris, un réseau de près de 250 kilo-



mètres de canalisation triphasée en service à 60 000 volts, ce qui représente 750 kilomètres environ de câbles à un conducteur.

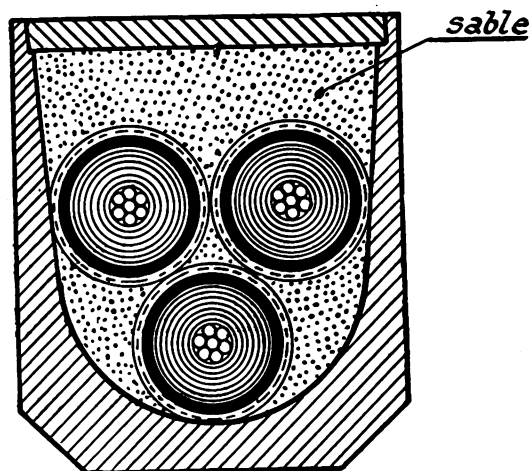
Ces câbles relient la Super-Centrale de Gennevilliers ainsi que la Centrale de Vitry-Nord et le Poste de Chevilly à diverses sous-stations de la banlieue parisienne (fig. 3).

D'autres projets sont en cours de réalisation par la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité qui se propose d'alimenter diverses sous-stations placées dans Paris par des canalisations à 60 000 volts.

Le câble à un conducteur prévu pour fonctionner sous la tension

composée de 60 000 volts est un câble de dimensions relativement réduites (fig. 4).

Ce modèle de câble a été établi en admettant que le rapport du rayon



**Fig. 5.** *Coupe d'un caniveau en ciment  
pour canalisation triphasée 60.000 V composée de 3  
câbles à 1 conducteur*

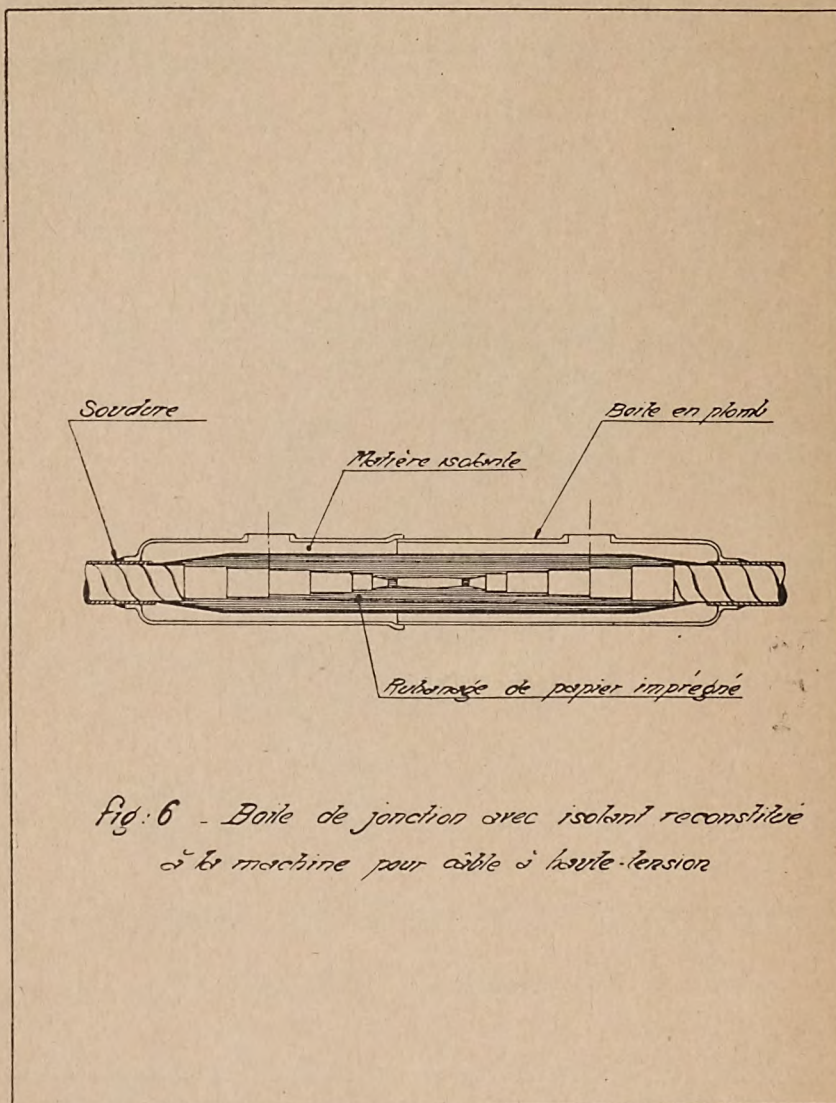
intérieur de l'enveloppe de plomb au rayon du conducteur doit être égal au nombre  $e$ , base des logarithmes népériens.

On sait que les câbles établis en respectant cette condition ont le diamètre extérieur le plus faible possible pour une valeur déterminée de la contrainte appliquée à l'isolant.

L'isolant est simplement protégé par un tube de plomb recouvert



d'un matelas de filin enduit, afin d'empêcher que le plomb ne soit détérioré pendant les opérations de la pose.



La protection mécanique est réalisée en posant les trois câbles simples qui forment la canalisation dans des caniveaux en ciment où leurs axes se placent suivant les arêtes d'un prisme équilatéral (fig. 5) : les coefficients de self-induction apparente de chacun des fils de ligne sont donc sensiblement égaux et aussi petits que possible puisque les câbles sont en contact les uns avec les autres.

On peut aussi, comme le fait la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité, placer les câbles sur des tablettes accrochées aux parois d'une galerie souterraine.

Dans les canalisations qui sont ainsi constituées, le courant qui circule dans chacun des conducteurs produit dans la gaine de plomb correspondante une force électromotrice qui est directement fonction de l'intensité du courant qui parcourt le conducteur et qui peut atteindre une trentaine de volts par kilomètre au moment de la pleine charge, dans un câble ayant une section de cuivre de 150 mm<sup>2</sup>.

Pour empêcher que ces forces électromotrices ne produisent des arcs jaillissant d'une gaine à l'autre, on réunit les trois gaines de plomb en court-circuit entre elles et avec la terre, de distance en distance, en sorte qu'il existe dans les gaines de plomb un courant de circulation permanent. La perte wattée qui en résulte est de l'ordre de 5 à 10 pour cent de la perte par effet Joule dans les conducteurs.

Quoique cette perte soit faible, elle grève cependant quelque peu les frais d'exploitation, mais, en regard de ce léger inconvénient, on doit considérer que les câbles à un conducteur présentent un gros avantage en raison de la facilité avec laquelle on peut réaliser les boîtes de jonction qui servent à raccorder les divers tronçons qui constituent la canalisation.

On en est venu, en effet, pendant ces dernières années, à reconstituer l'isolant autour des serre-fils qui assurent la continuité du conducteur ; cette reconstitution de l'isolant s'est faite tout d'abord en enroulant à la main des bandes de papier, mais il est possible actuellement de réaliser cette opération au moyen d'une machine qui enroule une feuille de papier imprégné autour du serre-fils d'abord, puis sur des gradins préalablement découpés dans l'isolant du câble de part et d'autre du serre-fils (fig. 6).

Ce procédé permet de monter très rapidement et avec toute sécurité une boîte de jonction.

Dans les câbles triphasés, au contraire, la reconstitution de l'isolant doit être faite à la main, car le montage à la machine nécessiterait que l'on écarte suffisamment les conducteurs les uns des autres pour laisser passer le rouleau de papier qui devrait tourner successivement autour de chacun des serre-fils. Cela est irréalisable et l'on en est réduit à enrouler le papier à la main. C'est un travail long et minutieux.



bles, en sorte que pour les tensions supérieures à 60 000 volts, il semble bien qu'il faille recourir à l'emploi des câbles à un conducteur. D'ailleurs, partout où l'on a dépassé la tension de 60 000 volts, c'est la solution par câbles simples qui a prévalu.

Il existe aux Etats-Unis trois réseaux à 66 000 volts, celui de CLEVELAND, celui de CHICAGO et celui de PHILADELPHIE.

Ces réseaux ont été constitués par des câbles à un conducteur.

En EUROPE, à part quelques essais qui ont été faits en Allemagne et en Angleterre avec des câbles triphasés, tous les réseaux importants ont été faits en câbles à un seul conducteur.

Il n'y a d'ailleurs, parmi les réseaux européens ou américains, aucun réseau souterrain à 60 000 volts dont l'importance puisse être comparée à celle du réseau de l'agglomération parisienne.

La France a donc pris la tête du progrès dans l'industrie des câbles et il serait intéressant que les constructeurs français soient mis à même de montrer qu'ils peuvent aborder, en toute sécurité, la fabrication de canalisations destinées à fonctionner sous des tensions plus élevées encore.

### Câbles à 132 000 volts

Jusqu'à maintenant, aucune installation de quelque importance n'a pu être réalisée en Europe ; c'est à Chicago qu'il a été possible de tenter un essai de fonctionnement sous la tension composée de 132 000 volts.

Il s'agit ici d'un câble d'expérience de 450 mètres environ de longueur fourni par « LES CABLES DE LYON » qui a été mis en service au mois d'août 1927 et qui fonctionne depuis cette date sans aucun incident.

Il y a lieu de remarquer que la fréquence utilisée sur ce réseau est de 60 périodes par seconde, en sorte que l'isolant est soumis à un vieillissement plus rapide que si la fréquence n'était que de 50 p. s.

Ce câble est relié directement à une ligne aérienne qui aboutit dans la région sud de CHICAGO.

Il a d'abord été mis sous tension à vide pendant une année environ. Les mesures qui ont été faites périodiquement n'ont décelé aucun affaiblissement des qualités de l'isolant. Après cette première année d'essai, il a été soumis à des échauffements et à des refroidissements périodiques.

Ces essais sont encore en cours et les résultats obtenus jusqu'à ce jour permettent de croire qu'une canalisation constituée avec trois câbles de ce modèle est susceptible de donner entière sécurité pour un fonctionnement à 132 000 volts. L'isolant de ce câble est fabriqué de la même manière que celui des câbles à 60 000 volts qui ont été posés à Paris.

Au moment où l'on entreprenait cette expérience, un autre modèle de câble à haute tension venait d'être mis au point par la Société Italienne PIRELLI.

Ce câble est constitué par un conducteur creux qui forme un canal central par lequel on remplit d'huile tout l'espace disponible à l'intérieur du tube de plomb.

De distance en distance, des réservoirs d'huile surélevés sont placés sur la canalisation, afin de maintenir une pression au moins égale à la pression atmosphérique dans les parties les plus hautes de la canalisation.

Des joints d'arrêt sont également intercalés, de façon à ce que la pression ne dépasse pas une valeur de 3 à 4 kg, par  $\text{cm}^2$ , dans les parties basses de la canalisation, afin de ne pas faire éclater le plomb ; lequel est d'ailleurs fretté par un ruban de cuivre.

Le coût d'une semblable installation est naturellement plus élevé que celui d'une installation faite avec des câbles du type normal, comme celui que « Les Câbles de Lyon » ont mis en essai à Chicago.

## TRANSMISSION DE L'ENERGIE PAR CANALISATIONS SOUTERRAINES A TRES HAUTE TENSION

On peut se demander quels sont les débouchés qui sont offerts à des câbles prévus pour fonctionner sous des tensions aussi élevées.

Tout d'abord, il ne paraît pas douteux qu'en raison des difficultés que rencontrent les exploitants pour pénétrer dans les agglomérations importantes avec des lignes aériennes à très haute tension, nous verrons utiliser les câbles souterrains à 120 000 volts pour transporter l'énergie au cœur même des villes jusqu'aux sous-stations de transformation.

Dans les centres où la population est dense, il n'a pas été possible, jusqu'à présent, de relier directement les lignes aériennes à haute tension aux sous-stations de distribution. On a eu recours aux câbles



souterrains à 35 000, 45 000 et 60 000 volts reliés aux lignes aériennes par l'intermédiaire de transformateurs situés dans des sous-stations établies aux abords des villes.

Un des avantages essentiels des câbles à 120 000 volts est de permettre la suppression de ces sous-stations intermédiaires, le câble prolongeant directement la ligne aérienne jusqu'au centre même de distribution. Les avantages qui en résultent sont les suivants :

— suppression du matériel, transformateurs et disjoncteurs et du personnel des sous-stations intermédiaires ; amélioration du rendement résultant de la suppression d'une transformation de l'énergie ; réduction du nombre des câbles souterrains ; meilleur réglage et meilleure stabilité dans la marche en parallèle des Usines locales et des sources d'énergie extérieures.

Il faut aussi tenir compte que la puissance dévattée en avant fournie par une canalisation à 120 000 volts est d'environ 850 kVA par kilomètre de feeder. Cela permet de diminuer la puissance apparente des compensateurs synchrones de 850 kVA pour chaque kilomètre de canalisation souterraine placée à l'arrivée de la ligne aérienne.

Mais il est probable que l'on ira plus loin dans cette voie et que nous verrons aussi utiliser les câbles souterrains pour le transport de l'énergie électrique à grande distance

Nous assistons déjà à la réalisation de grands réseaux téléphoniques souterrains qui se substituent peu à peu aux nappes de fils aériens qui longent les voies de nos grands réseaux de Chemins de Fer. Cette transformation est cependant très onéreuse, mais elle est devenue nécessaire pour assurer une plus grande sécurité à l'exploitation et pour améliorer la qualité des communications.

Ce sont donc surtout des considérations d'ordre technique qui l'emportent, dans l'intérêt général, sur les considérations d'ordre financier résultant de l'augmentation des frais de premier établissement.

Pour la réalisation des lignes de transport de force, nous montrons plus loin que le prix d'une canalisation souterraine peut être comparé à celui d'une ligne aérienne lorsque la puissance transportée est suffisamment importante.

Nous verrons également que les conditions de fonctionnement d'une ligne souterraine compensée sont comparables à celles d'une ligne aérienne également compensée, mais la sécurité d'exploitation de la canalisation souterraine est plus grande puisqu'elle supprime les dan-

gers inhérents à la nature même des lignes aériennes, dangers qui sont dûs aux agents atmosphériques, tels que le vent, le givre, la foudre, qui provoquent soit des ruptures de fils, soit des ruptures d'isolateurs. Et enfin, à une époque où l'aviation se développe avec rapidité, il est nécessaire de prendre en considération le danger que présentent pour les aviateurs, par temps de brouillard ou en cas de pannes, ces réseaux de fils sous tension qui ont déjà provoqué de nombreux accidents.

Au point de vue technique, le problème peut se résoudre sans grandes difficultés.

Toute ligne aérienne possède une résistance apparente d'autant plus grande qu'elle est établie pour une tension plus élevée, en raison des distances qu'il faut admettre entre fils.

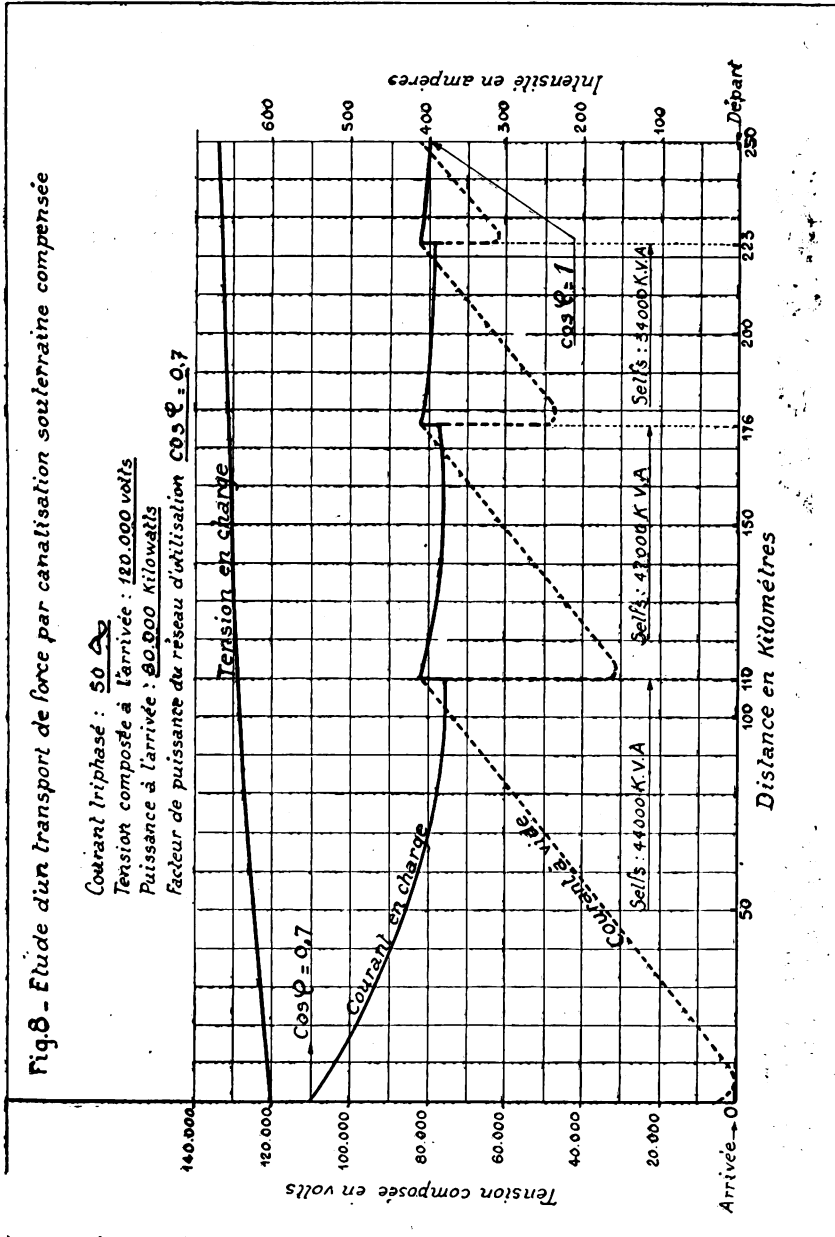
Pour diminuer cette résistance apparente, on en vient à ajouter des capacités, ou tout au moins leur équivalent, sous forme de compensateurs synchrones surexcités. On est arrivé à établir, comme l'ont proposé les Américains Baum, Fortescue, et tout récemment Mouradian, des lignes composées de tronçons complètement compensés de façon à ce que sur toute la longueur, le facteur de puissance propre de la ligne soit égal à l'unité.

Or, les câbles souterrains, grâce à leur capacité, possèdent par eux-mêmes la propriété d'améliorer le facteur de puissance de la ligne et de soulager les machines d'une importante partie de la charge réactive du réseau.

Si l'on considère, par exemple, le réseau de l'Union d'Electricité qui comprend près de 250 kilomètres de canalisation souterraine, la capacité totale des câbles est d'environ 50 microfarads entre chacun des fils de ligne et la terre, en sorte que la composante réactive de la charge se trouve diminuée de 50 000 kVA du seul fait de la présence des câbles souterrains.

Ceci se produit sur un réseau comme celui de l'Union d'Electricité où plusieurs feeders sont en parallèle au départ de l'Usine génératrice, mais si tous ces feeders étaient placés bout à bout pour constituer un transport de force de 250 kilomètres de longueur, le courant au départ de l'Usine génératrice aurait une valeur supérieure à l'intensité admissible dans le câble pendant la marche à vide ou à faible charge. Le transport de l'énergie serait ainsi limité à une centaine de kilomètres.

Pour transporter l'énergie à une distance plus grande, il serait nécessaire de compenser une partie du courant déwatté en avant dû à la



capacité de la ligne souterraine. Pour obtenir ce résultat, on pourrait songer à utiliser des compensateurs synchrones que l'on sous-excite.

rait, mais il semble qu'il serait plus simple et plus économique de répartir de distance en distance, le long de la ligne, de simples bobines de self-induction.

L'idéal serait de répartir uniformément ces bobines le long de la ligne, mais, comme on le fait en téléphonie, il paraît être plus facile et plus économique de concentrer les bobines de self-induction en des points judicieusement choisis.

Ajoutons que ces bobines, dont la construction diffère peu de celle des transformateurs, sont des appareils que l'on peut placer en plein air.

J'ai cherché à me rendre compte de l'efficacité du système dont je viens de parler en comparant le fonctionnement d'une canalisation souterraine et d'une canalisation aérienne transportant toutes deux 80 000 kilowatts à une distance de 250 kilomètres sous la tension composée de 120 000 volts, à la fréquence de 50 périodes par seconde. le facteur de puissance du réseau d'utilisation étant égal à 0,7.

Le calcul montre que, pendant le fonctionnement à pleine charge, le courant dans le câble est en phase avec la tension lorsqu'on se place à 110 kilomètres environ de l'arrivée (fig. 8).

Si nous plaçons l'Usine génératrice à cet endroit, elle fonctionnerait donc à pleine charge avec un facteur de puissance égal à l'unité et le courant, pendant la marche à vide, serait sensiblement égal au courant de pleine charge.

Pour pouvoir mettre l'Usine génératrice plus loin, c'est-à-dire réaliser un transport de force à plus de 110 kilomètres, il faudrait placer au point 110 kilomètres une bobine de self-induction capable d'annuler dans le tronçon de câble placé immédiatement en amont une partie du courant dû à la capacité de la ligne.

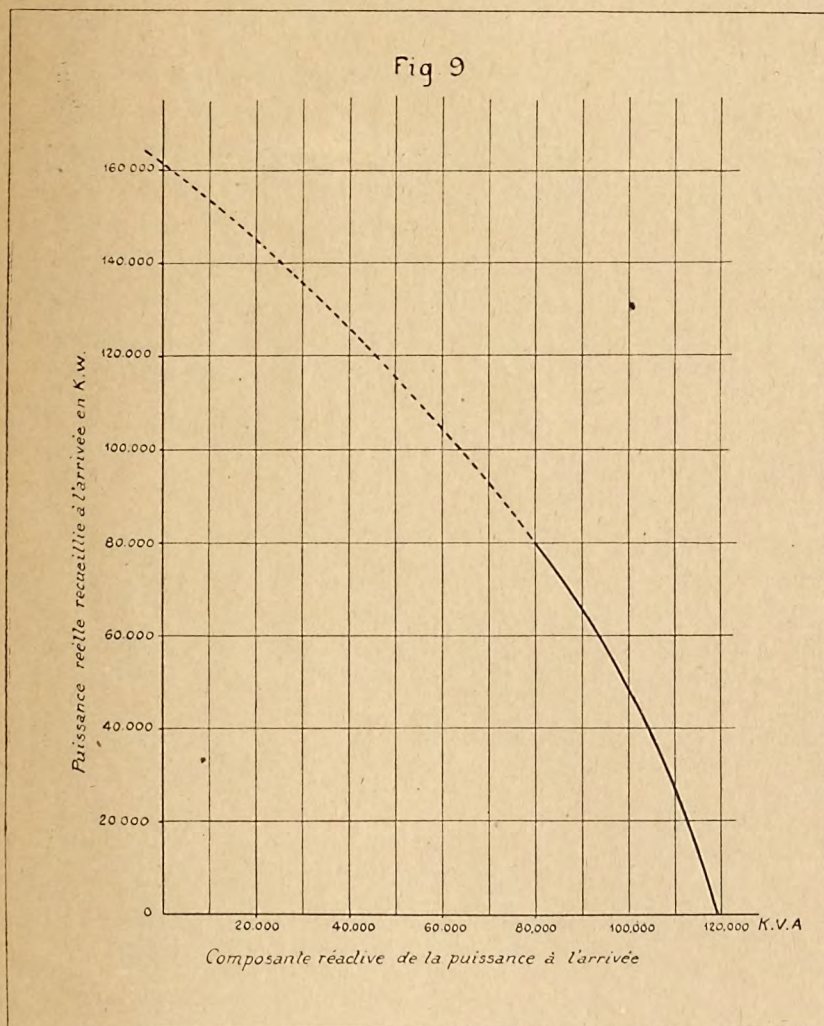
On peut ainsi aller jusqu'au kilomètre 176, en conservant une intensité presque constante et un facteur de puissance très voisin de l'unité.

Au kilomètre 176, on peut introduire une nouvelle bobine de self-induction et l'on voit ainsi que l'on arrive à faire fonctionner la ligne entre l'Usine génératrice et le point 110 kilomètres avec un facteur de puissance très voisin de l'unité en plaçant à des distances convenablement choisies les bobines de self-induction.

Dans l'exemple que nous avons choisi, la composante réactive absorbée par ces bobines serait de 125 000 kVA et leur prix serait d'environ deux millions de francs.

Ce dispositif permet de transporter la puissance de 80 000 kilowatts à 250 kilomètres avec un rendement de 0,87, en utilisant une section de cuivre de 250 mm<sup>2</sup> partout où l'intensité ne dépasse pas 420 ampères.

Dans la dernière partie du transport de force la composante de la



puissance réactive du réseau n'a pas été compensée, en sorte que la section du câble a été renforcée et portée à 400 mm<sup>2</sup> dans le dernier tronçon.

Ce renforcement de la section peut être graduellement fait, comme on le voit sur la figure, à partir du kilomètre 60 avant l'arrivée.

Dans l'étude que nous venons de faire, la tension au départ varie de 105 000 à 138 000 volts quand on passe de la marche à vide à la marche à pleine charge. Il est possible de diminuer cet écart en plaçant à l'arrivée une bobine de self-induction réglable suivant la charge. Si l'on règle par exemple cette bobine de façon que la composante décalée en arrière du courant absorbé à l'arrivée soit constante, la tension au départ variera seulement de 125 000 volts à 136 000 volts quand on passera de la marche à vide à la marche à pleine charge soit un écart de 9,7 pour cent.

Dans ce cas, la bobine placée à l'arrivée doit avoir une puissance apparente totale de 80 000 kVA. Le rendement de la canalisation est ainsi amélioré surtout aux faibles charges par la présence de cette bobine. En effet, l'appel de courant déwatté en arrière vient compenser en partie le courant de capacité le long de la ligne, en sorte que le courant qui circule dans la partie du câble en amont du kilomètre 118 jusqu'au kilomètre 250 est limité au courant watté résultant de la charge, l'Usine génératrice n'a plus à mettre en service pendant les heures creuses qu'une fraction de ses machines proportionnée à la charge demandée à l'arrivée.

On peut d'ailleurs aller plus loin et se proposer de maintenir absolument constante la tension au départ quelle que soit la charge. Dans ce cas, le calcul montre qu'il faut placer à l'arrivée une bobine de 110 000 kVA environ. Le réglage de cette bobine est fonction de la puissance wattée demandée à l'arrivée et de la puissance démagnétisante absorbée par le réseau d'utilisation de façon qu'à chacune des charges wattées corresponde à l'arrivée une charge démagnétisante constante.

Cette courbe de réglage est un arc de cercle représenté par la fig. 9. Dans le cas du transport que nous étudions, la tension au départ reste constamment égale à 134 000 volts quelle que soit la charge pour obtenir une tension constante de 120 000 volts à l'arrivée.

Les considérations qui précèdent montrent que l'emploi des bobines de self-induction placées en dérivation sur les canalisations souterraines permet de résoudre les différents problèmes qui sont actuellement résolus pour les lignes aériennes au moyen des compensateurs synchrones.

Il est également possible de traiter de cette manière le cas d'un transport souterrain d'interconnexion permettant l'échange réversible

d'énergie, c'est-à-dire le maintien aux extrémités de la canalisation de la même tension de 120 000 volts quels que soient la charge et le sens du transport.

### CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

Dans le cas où le transport de force que nous venons d'étudier serait réalisé au moyen d'une canalisation aérienne, il faudrait, pour obtenir un rendement à peu près équivalent, utiliser deux lignes fonctionnant en parallèle, de 250 mm<sup>2</sup> de section de cuivre chacune et leur adjoindre une batterie de compensateurs synchrones de 80 000 kVA.

Il est bien entendu que nous ne parlons de lignes en cuivre que pour la commodité de la comparaison, mais on pourrait constituer les conducteurs de la ligne aérienne et ceux de la ligne souterraine avec des câbles d'aluminium de même conductance que celle des conducteurs en cuivre.

Le prix des compensateurs synchrones est d'environ 75 fr par kVA si l'on tient compte de la valeur de l'appareillage et des bâtiments.

On voit donc que la compensation de la ligne aérienne coûterait environ 6 millions de francs, tandis que la compensation de la ligne souterraine ne coûterait que 2 millions.

Malgré cela, le prix de la ligne aérienne reste inférieur de 35 pour cent environ au prix de la canalisation souterraine.

Il faut cependant tenir compte, dans cette comparaison, que les frais d'entretien des canalisations souterraines peuvent être considérés comme négligeables par rapport aux frais d'entretien des lignes aériennes et que la durée d'un câble étant pratiquement illimitée, le taux d'amortissement doit être moins élevé pour les câbles que pour les lignes aériennes.

Ces dernières considérations ont été développées récemment par Petersen qui est arrivé à conclure que l'on pouvait admettre pour les câbles un prix de premier établissement supérieur de 30 à 40 pour cent à celui des lignes aériennes, sans que les charges annuelles soient augmentées.

Pour achever la comparaison de ces deux systèmes de transmission, il faut examiner quelle est la sécurité d'exploitation qu'ils donnent l'un et l'autre.

La ligne aérienne est sujette à de nombreuses avaries en sorte que les deux lignes fonctionnant en parallèle que nous avons considérées ne pourraient transmettre, en cas d'accident, à l'une d'elles, que la moitié de la puissance totale.

Pour avoir une sécurité complète, il faudrait donc installer une troisième ligne, ce qui grèverait les frais de premier établissement d'au moins 50 pour cent. Il est d'ailleurs probable que si l'on voulait pousser plus loin cette étude, on adopterait deux lignes aériennes doubles dont les conducteurs auraient une section de cuivre telle que la puissance totale puisse être transportée par 3 d'entre elles.

La canalisation souterraine est beaucoup moins vulnérable que la ligne aérienne, mais on peut cependant constituer une réserve en posant un quatrième câble que l'on substitue à l'un quelconque des trois autres, en cas d'avarie à l'un d'eux ; ceci ne majore les frais de premier établissement de la canalisation souterraine que de 30 pour cent environ.

### CONCLUSIONS

Finalement, en tenant compte des diverses considérations qui ont été développées, on voit que les prix de premier établissement de la ligne aérienne et de la canalisation souterraine peuvent parfaitement être mis en comparaison.

Il y a lieu enfin de remarquer que la différence de prix entre la ligne aérienne et la ligne souterraine s'atténue lorsque la puissance à transporter devient de plus en plus grande et il est donc parfaitement admissible, dans l'état actuel de la technique des câbles, d'envisager la réalisation de nos grands transports de force et de nos réseaux d'interconnexion au moyen de canalisations souterraines judicieusement compensées.

---



# INFORMATIONS

## DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

---

### I. — Nomination d'un Président d'honneur

Dans sa séance du 27 novembre dernier, le Comité d'Administration a décidé de proposer à l'Assemblée générale l'élection de M. Paul JANET comme Président d'Honneur de notre Société.

### II. — Attribution de la Médaille Mascart en 1930

Dans cette même séance, le Comité a décidé d'attribuer à M. Paul JANET, pour 1930, la Médaille triennale Mascart pour l'ensemble de son enseignement à l'Ecole supérieure d'Electricité et des travaux qu'il a fait exécuter au Laboratoire central d'Electricité.

Nous rappelons que la Médaille Mascart, fondée en 1923, a été décernée, en 1924, à M. André Blondel et en 1927 à Sir J. J. Thomson.

### III. — Errata au Bulletin de janvier 1930

a) Communication de M. BUNET sur *les considérations sur les Industries électrochimiques et électrométallurgiques françaises.*

Page 9, 12<sup>e</sup> ligne, au lieu de 80 000 000 kWh, lire 800 000 000 kWh par an.

b) Communication de M. DUVAL sur *les usines hydro-électriques et les lignes à 220 000 V aux Etats-Unis.*

Page 67, dans la 3<sup>e</sup> colonne du tableau : kWh vendus en milliards, lire : 1,427 -- 1,506 -- 2,000.

## OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ

---

### PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

**Das Bursten problem im Elektro Maschinenbau**, par HEINRICH W. Edité par Verlag von Roldenbourg, à Munchen et Berlin, année 1930. Un volume relié 24×16 cm. de 190 pages (Don de l'Editeur). Prix 12 Marks.

### LÉGISLATION

**Code des Distributions d'Electricité**, par ETIENNE CARPENTIER. Edité par la Société Anonyme du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, Paris (5<sup>e</sup>). Un volume broché de 418 pages, 18×12 cm., année 1926 (Don de l'Editeur).

**Propriétaires et Compagnies de Distribution d'énergie électrique**, par ACHILLE MESTRE. Edité par la Société Anonyme du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, Paris (5<sup>e</sup>). Une brochure de 60 pages, 21×13 cm., année 1925 (Don de l'Editeur).

**La Jurisprudence de la Houille blanche**, par ACHILLE MESTRE. Edité par la Librairie du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, Paris (5<sup>e</sup>). Une brochure de 82 pages, 22×13 cm., année 1929 (Don de l'Editeur).

**Le Nouveau régime légal des Distributions d'énergie Electrique**, par PIERRE JOLLY. Edité par la Société Anonyme du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot. Un ouvrage de 385 pages, 23×14 cm. (Don de l'Editeur).

**Cahier des charges pour les Distributions d'Energie**, par BOUGAULT PAUL. Edité par Jules Rey, 23, Grande-Rue, à Grenoble. Un volume broché 25×16 cm. de 345 pages, année 1922 (Don de l'Editeur). Prix 25 francs.

**La Législation des Chutes d'Eau**, par PAUL BOUGAULT. Edité par Jules Rey, 23, Grande-Rue, à Grenoble. Un volume de 25×16 cm. broché, 350 pages, année 1912 (Don de l'Editeur). Prix 8 francs.

**La Législation Nouvelle des Chutes d'Eau**, par PAUL BOUGAULT. Edité par Jules Rey, 23, Grande-Rue, à Grenoble. Un volume 25×16 cm. broché 265 pages (Don de l'Editeur). Prix 25 francs.

### CONGRÈS, EXPOSITIONS, ACTES OFFICIELS, ANNUAIRES

**Annuaire 1929 de la Société Amicale de Secours des Anciens Elèves de l'Ecole Polytechnique**. Edité par Gauthier-Villars et Cie, à Paris. Un volume de 688 pages, 21×13 cm. (Don de la Société Amicale).

### FORMULAIRES, AIDE-MÉMOIRES, MANUELS

**L'apprentissage de la T.S.F.**, par CLAVIER ANDRÉ. Edité par Albin Michel, 22, rue Huyghens, à Paris. Un volume broché de 190 pages deuxième édition revue augmentée et mise à jour. 25×16,5 cm. (Don de l'Editeur). Prix 15 francs.

**Physique Industrielle**, par IZART. Edité par Dunod (Agenda 1930). Un volume relié de 400 pages, 15×10 cm. (Don de l'Editeur (Prix 17 francs)).

**L'Electricité** par Fourcault L.-D. Edité par Dunod (Agenda 1930). Un volume relié de 490 pages, 15×10 cm. (Don de l'Editeur) Prix 17 francs.

**Agenda industriel** J.-B. Baillière, année 1930 « Electricité ». Edité par J.-B. Baillière et fils, 19, rue Hautefeuille, Paris. Un ouvrage de 370 pages, 16×10 cm., année 1930. (Don des Editeurs).

**Aide-Mémoire de l'Ingénieur.** Edité par les Etablissements Jules Cocard, à Paris. Un volume de 28×22 de 280 pages (Don des Etablissements Jules Cocard). Corrections et compléments et 3 diagrammes Mollier.

**Guide de l'Ingénieur Techno-Comptable,** par MELOT LÉON. Edité par l'Ecole Spéciale des Travaux publics du bâtiment et de l'Industrie. Un volume 22×17 cm., 416 pages, année 1929, broché (Don de l'Editeur).

### ENSEIGNEMENT

**Leçons sur les systemes d'équations aux dérivées partielles,** par MAURICE JOUET, professeur à l'Université de Caen. Edité par Gauthier-Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, Paris. Un volume broché 25×16 cm. de 122 pages (Don des Editeurs). Prix 30 francs.

---

## IL Y A TRENTE ANS

---

1<sup>o</sup> Réunion ordinaire mensuelle du 7 février 1900

Présidence de M. POLLARD

M. BOCHET rappelle au sujet des *lampes à arc à bas voltage* présentées par M. GOSSELIN à la séance de décembre 1899, que tout bon système de lampe permet le fonctionnement sous tension réduite, à condition que les crayons soient bien choisis, mais que, pour obtenir un fonctionnement régulier, il vaut toujours mieux conserver une résistance suffisante en circuit.

M. Roux confirme, d'après son expérience personnelle, qu'avec de bonnes lampes et de bons charbons, le montage par trois donne d'aussi bons résultats que le montage par deux. Il est même plus économique au point de vue des canalisations et de la dépense d'énergie, quand les lampes sont très groupées.

M. VEDOVELLI présente des systèmes d'*appareillage électrique* pour 3 000 V : interrupteurs Verity et Steele, fonctionnant à l'intensité normale de 50 A et coupant l'arc par interposition d'un écran en mica ; interrupteurs Vedovelli où l'huile est remplacée par l'eau ; coupe-circuits Steele dont le fil de plomb conique est contenu dans un tube en U plein d'huile ; la fusion se faisant dans la partie mince du fil, le tube bascule et l'huile étouffe l'arc ; interrupteur à cornes d'aluminium ou de zinc de M. Sprecher, d'Aarau ; appareil Steele de mise à la terre : quand sur une installation la tension est portée accidentellement à 400 V, un arc traverse une plaque mince de mica, et fait fondre un fil d'argent qui retenait un contact métallique ; celui-ci ainsi libéré est fermé par un ressort sur un circuit de terre.

### 2<sup>o</sup> Bulletin

Article nécrologique sur Hughes, inventeur du télégraphe imprimeur et du microphone, membre fondateur de la Société Internationale des Electriciens.

BULLETIN  
DE LA  
**SOCIÉTÉ FRANÇAISE**  
DES  
**ÉLECTRICIENS**

---

**SOMMAIRE**

---

**COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :**

Discussion de la Semaine d'octobre 1929 : Allocution de M. BUNET, Président de la Société Française des Electriciens, p. 227.

1<sup>re</sup> SECTION. — Sommaire, p. 228. — Les modèles mécaniques en électrotechnique ; applications aux problèmes de stabilité (MM. DARRIEUS, FALLOU, LARTIGUE), p. 229. — Les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil (MM. BETHENOD, LE MONNIER, NEU, DE PISTOYE, LEBOUCHER, BUNET, BERGEON, GIRAULT, GRATZMULLER, BOUCHEROT), p. 232. — Emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs (MM. NEU, BERGER, BUNET), p. 241. — Utilisation rationnelle du vent (MM. NEU, DARRIEUS), p. 244. — Les centrales thermiques américaines (MM. MATHIVET, SOSNOWSKI, BERGEON, RAUBER, GENISSIEU, NEU, BOUCHEROT, DARRIEUS), p. 247. — Sur un nouveau type de moteur asynchrone compensé (MM. DE PISTOYE, DARRIEUS, LE MONNIER, BUNET), p. 263.

2<sup>e</sup> SECTION. — Sommaire, p. 266. — L'éclairage par les tubes luminescents (MM. DARMOIS, LEPAPE, LEBLANC M., LAPORTE), p. 266. — La croissance des végétaux en lumière artificielle (MM. TRUFFAUT, HENRY, LEBLANC M., DARMOIS), p. 275. — L'optique des surfaces diffusantes (MM. J. DOUGNON, P. WAGUET), p. 276. — Etat actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles (MM. P. WAGUET, ROUX), p. 277.

3<sup>e</sup> SECTION. — Sommaire, p. 279. — L'accumulateur au plomb (MM. VUIGNER, CHENEVEAU, FERY, BLONDIN, JUMAU), p. 280. — Le Redresseur "Rectox" à oxyde de cuivre (MM. M. LEBLANC, DARMOIS), p. 290. — Le redresseur à anode colloïdale (M. ANDRÉ), p. 291. — Présentation avec commentaires de films sur la soudure électrique à l'arc et sur la soudure à l'hydrogène atomique (M. BRILLIE), p. 292.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.  
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

**4<sup>e</sup> SECTION.** — Sommaire, p. 296. — La limitation des court-circuits dans les réseaux haute tension (MM. FALLOU, DARRIEUS, LANGLOIS-BERTHELOT), p. 296. — Emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution (MM. BUNET, BOUCHEROT, DARRIEUS, FALLOU, AILLERET, A. ROTH), p. 304. — Postes extérieurs (MM. GASTINE, DAGUERRE), p. 312. — Le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes (MM. GRATZMULLER, BACHELLERY LARTIGUE), p. 313.

**5<sup>e</sup> SECTION.** — Sommaire, p. 320. — L'évolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques (MM. SALOMON, REYNAUD-BONIN), p. 320. Les alliages à haute perméabilité (MM. CHAUCHAT, LOUBRY DEMONTVIGNIER), p. 321. — La liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées (MM. VILLEM, REYNAUD-BONIN), p. 327. — La transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes (MM. FAYARD, CLAVIER, L. CAHEN, REYNAUD-BONIN), p. 328. — Une contribution à l'étude du filtrage des courants redressés (M. DEMONTVIGNIER), p. 331. — La protection du synchronisme sur les transmissions Baudot-Verdan (MM. BONNIN, REYNAUD-BONIN), p. 331.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 333.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 334.

IL Y A TRENTE ANS, p. 336.



# **SEMAINE DE DISCUSSIONS D'OCTOBRE 1929**

---

COMPTE RENDU STÉNOGRAPHIQUE DES DISCUSSIONS

---

**Séance d'ouverture du Lundi 21 Octobre 1929.**

---

M. BUNET, Président de la Société française des Electriciens, ouvre en ces termes la VI<sup>e</sup> Semaine de discussions :

MESSIEURS ET CHERS COLLÈGUES,

Nous ouvrons aujourd'hui la séance de discussions d'octobre de la Société Française des Electriciens pour la sixième fois.

Le programme que vous avez reçu vous montre le nombre et l'importance des questions qui vont être traitées, et qui résument les travaux de nos différentes sections au cours de cette année. Le succès des années précédentes sera ainsi confirmé et développé encore une fois, et je tiens à en remercier tout particulièrement les auteurs des mémoires qui ont été présentés ainsi que les présidents de nos sections, qui ont dirigé la confection de ces mémoires. Je remercie également tous ceux de nos membres qui prendront part à la discussion en nous apportant le fruit de leurs travaux et de leurs réflexions. Je les remercie comme président de la Société Française des Electriciens, mais aussi à titre personnel, puisque c'est grâce à cet amical concours que je vois menée à bien l'idée que j'avais soumise, il y a cinq ans maintenant, au président et au Comité de notre Société.

Comme l'année dernière, Messieurs, nous avons organisé pour les matinées des visites dans les différentes installations de la région parisienne. Nous espérons que vous approuverez le choix qui a été fait ;

d'ailleurs, le grand nombre d'entre vous qui se sont fait inscrire nous montre qu'elles sont très appréciées. Ces visites ont été autorisées de tous côtés avec la plus grande amabilité, ce qui nous montre combien on a en estime notre Société et combien d'amis nous avons de tous côtés.

## 1<sup>re</sup> SECTION. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

### SOMMAIRE

- 1° Discussion du rapport de M. DARRIEUS sur les modèles mécaniques en électrotechnique, applications aux problèmes de stabilité. — M. FALLOU : présentation du modèle mécanique établi par la Compagnie Westinghouse pour l'étude qualitative de la stabilité d'un transport de force. — M. LARTIGUE : expression mathématique de l'énergie d'un système matériel élastique en mouvement, p. 229.
- 2° Discussion du rapport de M. BETHENOD sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil. — M. LE MONNIER : conditions d'emploi simultané du démarrage étoile-triangle et d'un embrayage. — M. NEU : la valeur de l'intensité instantanée du courant au moment de la fermeture du circuit importe surtout; embrayage à retardement avec interposition d'un rhéostat dans le stator du moteur. — M. DE PISTOYE : la surintensité au passage d'étoile en triangle est de très courte durée. — M. LEBOUCHER : le démarrage d'un moteur muni d'une poulie Dem-Eglo donne largement le temps de passer d'étoile en triangle avant l'embrayage. — MM. BUNET, BERGEON, GIRAULT : hommage à M. Boucherot, inventeur du moteur à double cage. — M. GRATZMULLER : moteurs à simple cage ou à double cage Boucherot sont compatibles avec le changement du nombre de pôles pour le début du démarrage avant embrayage; avantages du nombre de pôles double. — M. BOUCHEROT : sur le New Mexico, la double cage a été adoptée pour changer la vitesse, plus que pour le démarrage proprement dit. — M. LE MONNIER : critiques sur le prix et les conditions de fonctionnement des moteurs à double cage pour l'usage courant. — M. DE PISTOYE : réponses à ces critiques, p. 232.
- 3° Discussion du rapport de M. NEU sur l'emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs. — M. BERGER : les machines fonctionnant dans l'hydrogène bénéficient de sa faible densité réduisant les pertes par ventilation et de sa grande conductibilité calorifique. — M. BUNET : système frigorifique Follain; solution Bunet-Corblin. — M. NEU : emploi d'air refroidi par de l'eau pulvérisée de température maximum 10°C. p. 241.
- 4° Discussion du rapport de M. NEU sur l'utilisation rationnelle du vent. — M. DARRIEUS : la sécurité est la difficulté principale des grands moulins; emploi de pales étroites en petit nombre et tournant très vite, p. 244.
- 5° Discussion du rapport de M. MATHIVET sur les Centrales thermiques américaines. — M. K. SOSNOWSKI : les Américains ont débuté en 1895 avec les turbines



de Laval de construction française. — M. BERGEON : la connaissance du prix de revient du kilowattheure permettrait d'étudier si le transport à Paris de l'énergie des centrales du Nord est possible économiquement. — M. MATHIVET : limites des teneurs en cendres pour l'emploi des combustibles. — M. RAUBER : emploi des hautes pressions dans les chaudières : 100 kg/cm<sup>2</sup> aux Etats-Unis, 70 kg/cm<sup>2</sup> à Saint-Denis ; l'Union d'Electricité envisage la construction d'unités de 100 000 kW sur un seul arbre ; elle emploie systématiquement la circulation d'air en circuit fermé pour le refroidissement des alternateurs ; l'« indice superficiel » d'une chaudière française atteint 0,04, soit 33 pour 100 de moins que les meilleurs chiffres américains ; dès 1919 le réchauffeur d'eau d'alimentation fonctionnait à Gennevilliers par prélèvement de vapeur aux turbines ; la production par les mines du Nord de l'énergie électrique nécessaire à la région parisienne revient à grever le prix du kilowattheure de 10 pour 100 pour la production des calories et de 20 à 25 pour 100 pour les charges financières. — M. MATHIVET : discussion des chiffres avancés par M. Rauber. — M. GÉNISSIEU : importance en France de la quantité d'eau de condensation et encombrement des batteries de réfrigérants. — M. MATHIVET : on peut fournir l'eau avec des forages ; des batteries de réfrigération en béton représentent avec la chaufferie un encombrement de 25 ou 30 pour 100 de celui du reste de l'usine. — M. NEU : la pression optimum à adopter pour la vapeur dépend du prix de l'argent. Les installations utilisant des réfrigérants ne donnent pas toujours un moins bon vide que celles utilisant de l'eau courante sale. — M. BOUCHEROT : les centrales thermiques perdent les quatre cinquièmes de la chaleur ; intérêt de la combinaison des industries électriques avec des industries de chauffage ? — M. BERGEON : lorsque le chauffage électrique sera utilisé à Paris, les mines du Nord pourront faire du transport d'énergie. — M. RAUBER : les étiages de la Seine indiqués par M. Genissieu sont exceptionnels. Les condensations fonctionnant avec des eaux de rivières très sales peuvent néanmoins approcher de 1 pour 100, du vide théorique. — M. DARRIEUS : le transport de l'énergie paraît plus économique par fil que sur rail. p. 247.

- 4<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. DE PISTOYE sur le nouveau type de moteur asynchrone compensé. — M. DARRIEUS : indépendance électromagnétique entre les bobinages à deux pôles et à quatre pôles ou six pôles. — M. LE MONNIER : toutes les combinaisons de polarités sont-elles également intéressantes ? — M. BUNET : rendement par rapport à un modèle asynchrone ordinaire à pleine charge et à quart de charge. — M. DE PISTOYE : en pratique si les pertes à vide d'un moteur asynchrone ordinaire sont de 900 W, celles d'un moteur compensé de même puissance, à la même vitesse, sont de 1 100 W. — M. LE MONNIER : le rendement propre du moteur compensé, si l'on tient compte de ce qu'il fournit en puissance réactive, est parfaitement comparable à celui du moteur asynchrone ordinaire, p. 262.

Présidence de M. GIRAULT,

*Ingénieur à la Compagnie l'Alsthom.*

Le Président donne la parole à M. DARRIEUS qui résume son rapport sur les *modèles mécaniques en électrotechnique, applications aux problèmes de stabilité* (1).

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, tome X, n<sup>o</sup> 96, août 1929, p. 794.

M. FALLOU. — M. Fallou présente le modèle mécanique établi récemment par la Compagnie Westinghouse et montre tout le parti que l'on peut tirer de cet appareil pour l'étude au moins qualitative de la stabilité d'un transport de force comprenant des usines génératrices et réceptrices, des lignes, et des compensateurs synchrones. Il rappelle que le principe essentiel de ce modèle a été donné pour la première fois par M. Parrieus dans son rapport à la Conférence Internationale des Grands Réseaux de 1925.

M. LARTIGUE. — J'ai démontré, en 1916, que l'énergie totale mise en jeu dans le cas général d'un système matériel élastique, animé d'un mouvement périodique complexe, pouvait être écrite sous la forme générale :

$$W_m = \frac{1}{2} M \cos \varphi \left[ \left( v^2 + \omega^2 \rho^2 - \frac{j^2}{\omega} \right) \right] \quad (1)$$

où  $M$  est la masse gravifique du système matériel considéré, et où les termes entre crochets sont les carrés de trois vitesses élémentaires efficaces de *translation* (ou vibration), de *rotation* (ou oscillation) et de *torsion* (ou expansion) :  $\varphi$  étant le déphasage ;  $\omega$ , la pulsation périodique, égale à  $2 \pi$  fois la fréquence ;  $v$ , la vitesse linéaire efficace de translation ;  $\rho$ , le rayon de giration ;  $j$ , une accélération linéaire due à la réaction du système contre la déformation élastique.

Et que l'énergie électrique totale mise en jeu dans le cas général d'un courant périodique, parcourant un circuit complexe, avait une expression générale algébriquement identique à la précédente :

$$W_e = \frac{1}{2} M_e \cos \varphi \left[ R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right] \quad (2)$$

où les termes entre crochets sont les carrés de trois vitesses élémentaires apparentes — dimensions  $[LT^1]$  — de *résistance électrique*, d'*inductance* et de *capacitance*.  $M_e$  étant la masse électrique véritable, laquelle n'est ni la pseudo-masse *magnétique* que l'on fait généralement dériver des formules de Coulomb (quoiqu'elles n'aient point les dimensions physiques d'une masse gravifique) : c'est la masse de l'éther réellement mis en action dans le circuit considéré, masse dont la valeur — dimension  $[M]$  — est représentée par :

$$M_e = \frac{2 I_{\text{eff}}^2 l}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$$

Les expressions ci-dessus rappelées pour l'énergie électrique  $W_e$ , et pour la masse électrique  $M_e$ , correspondent au langage usuel des unités électromagnétiques pratiques, où l'on attribue à la *perméabilité magnétique*,  $\mu$ , les dimensions physiques  $[M^\circ L^\circ T^\circ]$ . Mais, ainsi que je l'ai indiqué le 7 décembre 1916 devant notre Société, tout autre langage conduit aux mêmes résultats. Par exemple, dans le système des unités électromagnétiques avec  $\mu$  quelconque, j'ai obtenu, avec M. G. Fournier :

$$W_e = \frac{1}{2} \left[ \frac{2 (\mu I_{\text{eff.}}^2) t}{\mu^{-1} \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \right] \cos \varphi \left[ \frac{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}{\mu^2} \right],$$

et dans le système des unités électrostatiques, avec *perméabilité diélectrique*,  $\varepsilon$ , quelconque :

$$W_e = \frac{1}{2} \left[ \frac{2 (\varepsilon E_{\text{eff.}}^2) t}{\varepsilon^{-1} \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \right] \cos \varphi \left[ \frac{\varepsilon^{-2}}{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \right],$$

expressions dans lesquelles la quantité entre premiers crochets a toujours pour dimensions  $[M]$ , et la quantité entre seconds crochets  $[LT^{-1}]$  au carré.

D'ailleurs, des modifications toutes semblables pourraient être apportées à l'expression de l'énergie cinétique d'un système élastique en mouvement, si l'on voulait substituer au langage usuel de la Mécanique, où la *perméabilité gravifique*,  $\gamma$ , a pour dimensions physiques  $[M^\circ L^\circ T^\circ]$  : premièrement, le langage où  $\gamma$  deviendrait quelconque ; ensuite le langage dans lequel on remplacerait, comme l'a montré M. Daniel Berthelot, le point de vue d'un observateur A par celui d'un observateur B inversement situé par rapport au mouvement relatif (*Bulletin* d'Août 1914, pages 379 à 384).

Ceci revient à dire qu'à l'exception des noms ou symboles arbitrairement attribués aux paramètres, le *théorème des forces vives* a identiquement la même expression algébrique dans un système *élastique*, c'est-à-dire dans la matière, et dans un système *électrique*, c'est-à-dire dans l'éther ; correspondance algébrique qui se poursuit terme à terme, entre la résistance électrique et une vitesse linéaire, entre le coefficient de self-induction et un rayon de giration, entre la capacité électrostatique et l'inverse d'une accélération linéaire ; l'analogie est évidente avec les correspondances de modèles que vient de nous exposer M. Darrieus.

Comme il l'a dit, ces modèles sont extrêmement utiles pour bien se rendre compte de la forme des phénomènes, ou de la manière dont les choses peuvent se passer. Mais quand il a rappelé qu'on doit pouvoir en construire « une infinité » dès qu'on en a fait un, je n'ai pu m'empêcher de penser que ceci était plus théorique que pratique. On peut évidemment construire, pour un phénomène donné, un certain nombre de modèles distincts, correspondant à autant d'observateurs différents A, B, C... Mais leur nombre infini est pour moi une fiction qui rappelle l'anecdote connue d'une voiture, mathématiquement définie comme « un châssis rigide porté par  $n$  roues ». Cela implique aussi une infinité de solutions, et même, oserai-je dire, plusieurs infinités, attendu que  $n$  peut être positif ou négatif, entier ou fractionnaire, réel ou imaginaire. Pratiquement, les constructeurs de voitures ne retiennent que les solutions les plus simples, les autres ne comptent pas.

Pour terminer, je suis persuadé qu'il y a ici quelqu'un à qui le juste éloge des modèles mécaniques a dû faire aussi grand plaisir ; c'est M. Girault, qui préside notre séance, et qui a tout récemment fait paraître lui-même, dans la *Revue d'Electricité et de Mécanique*, une série d'articles des plus intéressants sur « une image mécanique de l'hystérésis ».

M. BETHENOD. — M. Bethenod résume son rapport sur « *Les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil* » (1).

M. LE MONNIER. — Les rapports que nous ont présentés M. de Pistoye l'an dernier et M. Bethenod aujourd'hui, nous apportent un exposé très documenté de l'état de la question du démarrage des moteurs asynchrones tant au point de vue des dispositifs électriques que des dispositifs mécaniques propres à effectuer cette opération.

Il est cependant un point qui semble mériter que l'on s'y arrête et sur lequel les auteurs n'ont pas attiré l'attention : il s'agit des conditions d'emploi du couplage successif en étoile et en triangle. M. Bethenod vient de nous dire que cet artifice est d'un usage nécessaire dans le cas où l'on doit réduire l'à-coup de courant au démarrage. Il est en

---

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, t. IX, septembre 1929, n° 97, page 923.

effet d'un emploi très fréquent, mais son efficacité semble devoir être dans bien des cas fort aléatoire, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte

Le démarrage étoile-triangle comporte en réalité deux pointes de courant : une à chaque enclenchement. On réduit à peu près au tiers du courant de court-circuit en triangle, l'appel de courant au premier enclenchement en effectuant le démarrage en étoile.

Pour que l'appel de courant au second enclenchement ne dépasse

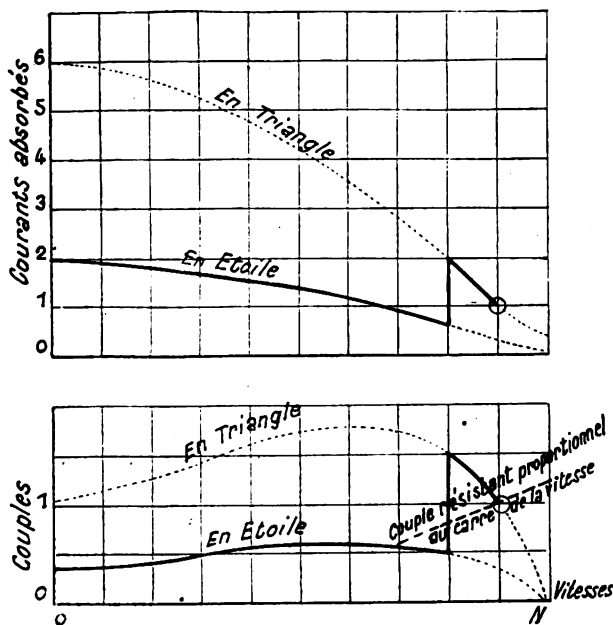


FIG. 1. — Courbes des couples sur l'arbre et des courants absorbés en fonction des vitesses avec le groupement en étoile et le groupement en triangle sous tension et fréquence constantes.

pas cette première valeur, il faut que le moteur ait pu atteindre une vitesse telle que le courant en triangle soit inférieur pour cette vitesse au tiers du courant de court-circuit, ce qui fixe la valeur maximum que le couple résistant ne doit pas dépasser à cette vitesse, dans le fonctionnement en étoile.

Si l'on trace, en fonction des vitesses, les caractéristiques de couple et de courant d'un moteur asynchrone en court-circuit ordinaire pour les deux régimes de marche sous pleine tension, avec le montage en étoile d'une part, le montage en triangle d'autre part (fig. 1), on cons-

tate que cette valeur du couple résistant à la vitesse du couplage est, en général, assez faible.

Sur l'exemple que nous avons choisi et qui donne une image assez exacte du fonctionnement d'un moteur moyen de 4 à 10 ch à 4 pôles, on voit que, au départ, on a un couple égal au tiers du couple normal avec un appel de courant égal à 2 fois le courant normal et que, lors du passage, on aurait un couple égal à la moitié du courant normal pour le même appel de courant, égal à 2 fois le courant normal. Le passage doit se faire alors au  $8/10^e$  environ de la vitesse de synchronisme.

Quand on emploie simultanément le démarrage étoile-triangle et un embrayage, il faut, pour que ces dispositions soient complètement efficaces, que le passage d'étoile à triangle soit fait avant que l'embrayage n'ait assuré l'entraînement de l'organe à commander. Une manœuvre de ce genre peut être exécutée correctement avec un embrayage à main (poulie folle, etc...), elle ne peut l'être que très difficilement avec un appareil automatique. Il faut avoir recours alors aux artifices retardateurs que nous a signalés M. Bethenod pour arriver à ce résultat et on n'est peut-être pas encore complètement assuré d'atteindre le but que l'on s'est proposé <sup>(1)</sup>.

Dans le cas de la commande d'une pompe ou d'un ventilateur, par exemple, pour lesquels on recommande volontiers ces dispositions, on peut admettre que le couple résistant varie comme le carré de la vitesse. On constate alors que si la pompe ou le ventilateur sont entraînés directement ou sont entraînés par un embrayage insuffisamment retardé, le couple résistant sera équilibre au couple moteur en étoile pour une vitesse égale aux deux tiers environ de la vitesse de synchronisme et dans ce cas l'appel de courant lors du passage atteindra 3 fois le courant normal, alors que l'appel de courant au départ n'a été que de deux fois le courant normal.

---

(1) Si l'on se reporte aux oscillogrammes publiés par M. Leboucher (*R. G. E.*, juin 1928, tome 23, page 1048 et page 1130), relatifs au démarrage en étoile-triangle d'un moteur de 7 ch muni d'une poulie D.E.M. Eglo, on constate que le moteur en étoile a vite atteint son état de régime, c'est-à-dire sa vitesse maximum au bout de 35 p. s et que, d'autre part, l'accrochage de l'embrayage a lieu au bout de 90 p. s : c'est donc dans cet intervalle de temps d'environ une seconde (55/50<sup>e</sup> de seconde), que l'on doit effectuer la manœuvre de passage, faute de quoi on perd le bénéfice de la combinaison du démarrage étoile-triangle et de l'embrayage automatique à retardement ; si l'on effectue le passage trop tôt, avant que le moteur ait atteint sa vitesse maximum, ou trop tard, après l'accrochage de l'embrayage, l'appel de courant lors du passage est plus élevé qu'au départ.

Cette première observation conduit tout naturellement à la seconde, relative à l'incompatibilité grave qui existe entre l'emploi des moteurs à double cage et l'usage du démarrage étoile-triangle. Nous assistons depuis quelques années, en France comme à l'étranger, à une recrudescence de floraison des moteurs à double cage dans lesquels on semble avoir mis, peut-être bien imprudemment, de grandes espérances. On a pris l'habitude, en effet, de dire qu'avec un moteur à double cage, « si, pendant la période de démarrage, la machine à entraîner a un couple résistant ne dépassant pas la moitié du couple normal, on peut démarrer le moteur avec couplage étoile-triangle sans

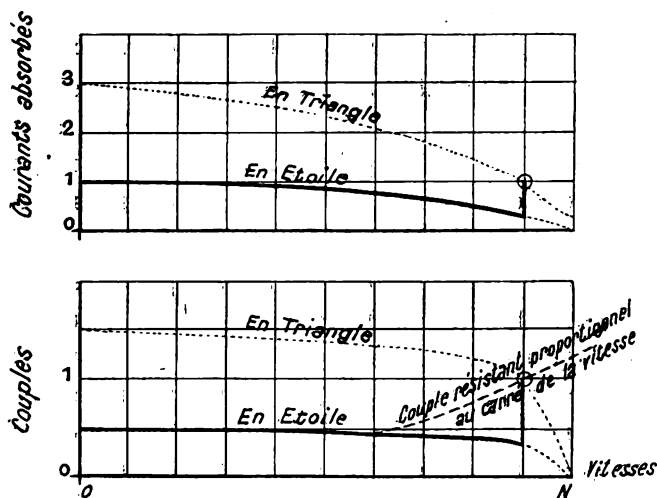


FIG. 2. — Courbes des couples sur l'arbre et des courants absorbés en fonction des vitesses avec le groupement en étoile et le groupement en triangle sous tension et fréquences constantes.

que l'appel de courant dépasse le courant normal ». Il est facile de voir que ces conditions sont impossibles à réaliser étant donné les caractéristiques mêmes du moteur à double cage dans lequel on s'est appliqué à reporter le couple maximum à la vitesse nulle.

Si nous traçons comme précédemment en fonction des vitesses, les courbes des couples et des courants absorbés d'un moteur moyen de 4 à 10 ch à 4 pôles à double cage (fig. 2), nous constatons que l'on peut bien, au départ, réaliser avec le couplage étoile un couple égal à la moitié du couple normal avec un courant égal au courant normal dans le fonctionnement en triangle ; mais ce couple étant un maximum, le moteur ne peut prendre de vitesse que si le couple résistant est

INFÉRIEUR à la moitié du couple normal et le passage d'étoile à triangle ne pourra avoir lieu que si le couple résistant ne dépasse pas LE TIERS ET NON LA MOITIÉ du couple normal. Le passage se fera alors à la vitesse normale de fonctionnement du moteur.

Si nous prenons l'exemple précédent de la commande d'une pompe ou d'un ventilateur accouplé directement à un moteur à double cage, on constate que, du fait de la loi de variation du couple résistant de ces appareils, le couple résisant fera équilibre au couple moteur en étoile pour une vitesse égale aux  $6/10^e$  environ de la vitesse de synchronisme. S'il est donc exact que, au départ, l'appel de courant ne dépassera pas le courant normal, lors du passage d'étoile à triangle, l'appel de courant dépassera légèrement *le double* du courant normal.

Ces faiblesses de l'emploi combiné du moteur à double cage et du couplage étoile-triangle, n'ont d'ailleurs pas échappé à M. Rieunier qui nous a signalé, dans ses rapports, les pointes importantes de courant qu'il a observées lors du passage, au cours des essais effectués au début de cette année à Courbevoie.

On voit donc que l'on est bien loin des espérances auxquelles on s'était laissé aller et que si le moteur à double cage a par lui-même des caractéristiques tout à fait intéressantes, c'est réaliser une alliance malheureuse que de l'employer avec démarrage étoile-triangle. Pour parer à ces difficultés, il est d'ailleurs inutile de chercher à relever, comme l'ont fait certains constructeurs, la valeur du couple au départ. Il ne sert à rien, en effet, de réaliser un couple au départ atteignant les  $3/4$  du couple normal, puisque lors du passage on sera toujours limité au TIERS du couple normal, si l'on s'astreint à ne pas dépasser sensiblement le courant normal.

Il semble donc en résumé que, s'ils sont coûteux, les dispositifs d'embrayages automatiques ou de double cage n'apportent qu'une solution bien imparfaite du problème du démarrage des moteurs asynchrones en court-circuit.

M. NEU. — Cette question du démarrage des moteurs asynchrones a fait le sujet d'études et de discussions à la commission technique du Syndicat des Producteurs et Distributeurs d'Electricité qui s'est placée au point de vue de la répercussion des démarrages sur l'éclairage assuré sur le même réseau, et la commission a surtout retenu la valeur de l'intensité instantanée du courant au moment de la fermeture du



circuit, et non la durée de la surintensité jusqu'à l'obtention de la marche en régime.

On a été amené à discuter l'intérêt des embrayages, puisque l'intensité maximum au moment de la fermeture du courant ne dépend que des constantes de construction des moteurs.

Je me suis permis d'intervenir pour expliquer que, si on réalise un embrayage à retardement, on peut alors résoudre simplement le problème de la limitation de la pointe d'intensité, en interposant un rhéostat dans le stator du moteur. Ce rhéostat, bien entendu, réduit considérablement le couple, mais si le moteur est muni d'un embrayage permettant la mise en vitesse du moteur avec faible couple, cela sera sans inconvénient.

Un rhéostat par lui-même n'est pas un engin compliqué, mais si on emploie un moteur avec rhéostat dans le rotor, le moteur et l'appareillage se compliquent, alors que le rhéostat dans le stator ne présente pas ces inconvénients.

Je pense que cette solution mériterait d'être étudiée de plus près pour donner satisfaction, d'une part aux distributeurs qui doivent éviter les à-coups sur leurs réseaux, et d'autre part, aux clients qui seraient très désireux de voir augmenter le champ d'application des moteurs à cage d'écureuil.

M. DE PISTOYE. — Dans ses appréciations sur le démarrage étoile-triangle des moteurs asynchrones à cage, M. Le Monnier ne paraît pas avoir suffisamment tenu compte de la très courte durée de la surintensité au passage d'étoile en triangle. J'ai eu en mains récemment des oscillogrammes relevés au laboratoire d'un secteur de la région parisienne sur un moteur Boucherot de 5 ch. La pointe de courant au passage d'étoile en triangle ne dure que deux ou trois périodes, soit moins de un dixième de seconde, et son influence sur la lumière n'est pas perceptible à l'œil. Cette pointe, quoique réelle, n'a donc aucune importance pratique, si le moteur, démarrant à vide ou à faible charge, peut, par suite, approcher suffisamment en étoile de la vitesse de synchronisme. C'est le cas avec les accouplements centrifuges. On voit également, sur les courbes du couple en fonction de la vitesse, de M. Le Monnier qu'il en est ainsi toutes les fois que le couple résistant ne dépasse pas celui de demi-charge : le moteur Boucherot, exécuté avec un couple de démarrage égal au double du couple normal

à plein flux a, au démarrage en étoile-triangle, les deux tiers du couple normal à l'arrêt ; ce couple décroît à peine quand la vitesse croît jusqu'à 15 ou 20 pour cent au-dessous du synchronisme ; si à ce moment on couple en triangle, la fin de la mise en vitesse est extrêmement courte, comme je viens de le dire, et la pointe de courant correspondante passe inaperçue.

D'ailleurs, la même objection que celle faite par M. Le Monnier, a été soulevée en Allemagne contre le moteur Boucherot, lors des discussions qui ont eu lieu dans ce pays sur ce sujet, il y a deux ou trois ans ; or, les constructeurs qui étaient opposés à ce moteur, à cette époque, en construisent actuellement comme les autres.

M. LEBOUCHER. — Tout à l'heure, M. Le Monnier a dit que, dans le démarrage d'un moteur muni d'une poulie Dem-Eglo il s'écoulait seulement une seconde et demie entre la fermeture de l'interrupteur et l'embrayage de la poulie, et qu'en conséquence on n'avait pas le temps matériel de passer d'étoile en triangle avant l'embrayage.

Pour calculer cette durée, M. Le Monnier a compté patiemment, sur l'oscillogramme publié par la *Revue Générale de l'Electricité*, le nombre de périodes comprises entre le démarrage du moteur et l'embrayage. Or, il se trouve que l'oscillogramme en question a été mal reproduit ; pour pouvoir mettre en évidence les différentes pointes de courant à une échelle convenable et les faire figurer sur la même page, l'oscillogramme a été tronqué dans sa partie médiane et on a représenté les deux extrémités seulement, mais la coupure a disparu à l'impression.

En résumé, l'embrayage dure beaucoup plus longtemps que ne le pense M. Le Monnier et on a tout le temps de faire la manœuvre.

Le phénomène peut s'expliquer ainsi : au premier mouvement du moteur, la bague de verrouillage coince les blocs en les retenant vers le centre et elle les maintient là tant que le moteur accélère. Dès qu'il a pris sa vitesse, la bague se dégage lentement, en prenant de l'avance sur les blocs dans le sens du mouvement et elle permet alors à ceux-ci d'effectuer l'embrayage. En agissant sur l'inertie de la bague et sur l'angle des faces de coincement, on peut doser à volonté le temps de l'embrayage.

Comme l'indique M. de Bistoye, l'oscillogramme montre que la pointe ne dure que 2 à 3 périodes au moment du passage en triangle.

ce qui fait que cette pointe est absolument sans effet sur les lampes voisines, on ne saurait trop insister sur ce point.

Je ne crois donc pas que les objections de M. Le Monnier soient à retenir.

M. BOUCHEROT. — Je désirerais savoir quel est le moteur à double cage dont il est question ici.

M. BUNET. — Je tiens à rappeler que l'inventeur du moteur à double cage est M. Boucherot et c'est son nom qu'on lui donne en Allemagne. Nous ne sommes pas assez fiers de nos inventeurs français. Il est regrettable que le moteur Boucherot n'ait pas été divulgué plus intensément et plus rapidement qu'il ne l'a été. C'est un hommage que je suis heureux d'enregistrer tout en regrettant qu'il soit si tardif.

M. BERGERON. — On parle beaucoup du moteur Boucherot actuellement en Hollande, en Allemagne et en Amérique.

M. GIRAULT. — Cet usage s'est répandu dans la littérature.

M. BOUCHEROT. — J'ai vu des publications allemandes dans lesquelles ce moteur est appelé « moteur à induit (anker) Boucherot ». J'ai été moins heureux avec nos amis les Américains. Par exemple, ils ont équipé, pendant la guerre, le New-Mexico, cuirassé de 30 000 ch, avec de tels moteurs (4 de 7 500 ch) mais, dans le numéro spécial du Bulletin de la GEC<sup>o</sup> consacré à la description de ce navire, je n'ai pas trouvé mon nom une seule fois.

M. GRATZMULLER. — En résumé, les embrayages centrifuges permettent le démarrage à vide des moteurs, par suite une durée réduite correspondante d'appel de courant sur le réseau. Puis l'embrayage permet de n'utiliser le plein couple du moteur que lorsque celui-ci a atteint les conditions de fonctionnement optima, c'est-à-dire, la vitesse du moteur compatible avec le maximum de couple et avec le minimum d'appel du courant sur le réseau. (Analogie avec les moteurs d'automobiles.)

L'embrayage centrifuge n'est pas contradictoire, à ce point de vue, avec l'emploi du moteur Boucherot double cage. Celui-ci réduit encore l'appel de courant précédant l'embrayage avec production d'un couple supérieur à celui du moteur à simple cage.

Moteurs à simple cage ou moteurs à double cage Boucherot sont compatibles avec le changement du nombre de pôles pour la période du début du démarrage avant embrayage. On sait que les courants appelés sur le réseau sont réduits dans la période comportant le nombre de pôles doublé. Mais cela procure l'avantage important que jusqu'à la réduction du nombre de pôles, le moteur ne pouvant dépasser la demi-vitesse, l'embrayage ne peut entrer en jeu d'une façon certaine que lorsque le moteur est à pleine vitesse, *avec le couplage électrique définitif*.

Cela ne se produit pas forcément avec le couplage étoile-triangle, puisque l'embrayage peut se produire avec le couplage étoile.

La pratique des poulies Dem et Dem-Eglo, qui sont des appareils de très bonne mécanique, m'a confirmé dans cette opinion.

Je conclus que le facteur temps intervient heureusement dans la durée de la perturbation ; la grandeur des courants appelés sur le réseau est réduite. Pour ces raisons, les embrayages centrifuges permettant l'emploi des moteurs à cage *doivent se répandre de plus en plus* et, suivant la grandeur de la perturbation tolérée sur le réseau, les solutions plus complexes ci-dessus permettront d'élever les limites de puissance de ces moteurs tolérables.

M. BOUCHEROT — C'est exact ; les moteurs du New-Mexico marchent à deux vitesses. C'est surtout pour ce changement de vitesse qu'ils ont adopté la double cage, encore plus que pour le démarrage proprement dit. Il y a ainsi plus d'élasticité pour passer d'une vitesse à l'autre, aussi bien pour ralentir que pour accélérer.

M. LE MONNIER. — Dans le cas de moteurs à plusieurs polarités, la question de prix n'intervient pas ; le moteur Boucherot peut alors être intéressant mais, pour l'usage courant, le prix en est excessif et les conditions de fonctionnement moins bonnes. Ces moteurs sont trop compliqués et n'ont pas le rendement d'un moteur à simple cage.

M. DE PISTOYE. — Le prix du moteur Boucherot n'est que de peu supérieur à celui du moteur à simple cage, mais son courant à vide est le même ; il en résulte que son facteur de puissance aux faibles charges, jusqu'au voisinage de la demi-charge, est le même que celui du moteur à simple cage. Or, le facteur de puissance des ateliers dépend avant tout des moteurs marchant à faible charge ; le moteur Boucherot n'a donc aucune influence nuisible sous ce rapport.

M. NEU. résume son rapport sur « *l'emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs* ». (1)

M. BERGER. — M. Neu, dans son rapport, signale l'emploi de l'hydrogène comme agent refroidisseur. Il semble utile d'insister sur ce point.

Vous savez qu'en Amérique, on a fait l'expérience, et que des machines fonctionnent dans l'hydrogène. On bénéficie surtout de deux propriétés importantes de ce gaz, à savoir sa faible densité, ce qui permet, dans un condensateur synchrone, par exemple, de réduire les pertes par ventilation et d'améliorer sensiblement le rendement ; et on utilise, d'autre part, sa haute conductibilité calorique, ce qui permet un refroidissement efficace. Aussi, il est à prévoir qu'en France les constructeurs ne tarderont pas à établir de grosses machines (turbo-alternateurs ou condensateurs synchrones) refroidies par l'hydrogène et présentant une économie pour l'exploitant, ce qui ne doit pas empêcher d'ailleurs d'étudier les procédés ingénieux signalés par M. Neu.

M. BUNET. — Dans un des intéressants systèmes dont nous a parlé M. Neu on refroidit les machines électriques au moyen de machines frigorifiques auxiliaires. Si l'on se contente de prendre des machines frigorifiques de types courants à anhydrides carbonique ou sulfureux, à chlorure de méthyle, on sait que, pour enlever de la chaleur il faut fournir du travail, ce qui correspond à ce qu'on peut appeler un rendement négatif. Pour enlever la puissance  $P$  dissipée en chaleur dans la machine électrique, il faut fournir  $0,3 P$  dans de bonnes conditions, soit envoyer au condenseur de la machine frigorifique,  $1,3 P$ . Cela tient à ce que la température de la vapeur formée est plus basse que celle de l'eau qui circule dans le condenseur.

M. FOLLAIN (*Revue Générale du Froid*, mars 1920) a présenté un système basé sur une machine frigorifique absorbant, au lieu de puissance mécanique, de la vapeur d'eau envoyée dans un électro-condenseur. On ne peut aller loin dans cette voie. M. Follain se limitait

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série. t. IX, mai 1929, n° 93, p. 542.

à tout au plus 15 ou 20° C pour le refroidissement possible de l'air à l'entrée de la machine électrique, relativement à ce que l'on a sans machine frigorifique : la température de la machine électrique ne s'abaisserait pas plus.

Quant aux dispositions qui consistent à envoyer directement de l'eau dans l'air de circulation, des essais ont été faits aux Etats-Unis et abandonnés, parce que si, théoriquement, à condition qu'on ne refroidisse jamais l'air au-dessous de la température à laquelle l'eau se condense, il n'y a aucun danger, en pratique, on n'aime pas beaucoup envoyer de l'eau dans une machine électrique.

En 1919, nous avons étudié, en collaboration avec M. Corblin, la solution suivante ; considérons la machine électrique à refroidir comme une chaudière électrique. Amenons un liquide, projetons-le sur les parties chaudes où il entrera en ébullition ; la vapeur sera envoyée dans un moteur où une portion des pertes de la machine électrique sera restituée en puissance mécanique, puis dans un condenseur à circulation d'eau qui enlèvera le complément de ces pertes. De là, une pompe à liquide peu importante retournera le liquide dans la machine électrique.

On passe ainsi au condenseur les pertes de la machine électrique moins la restitution dans la machine à vapeur auxiliaire. Cette récupération est d'ailleurs faible, une fraction des pertes assez petite généralement, et on trouverait souvent qu'elle est peu intéressante.

On supprimerait alors la machine auxiliaire et la vapeur irait directement au condenseur.

Il faudrait employer un liquide entrant en ébullition à la pression qui se maintiendrait dans la machine et à la température qui s'établirait, un peu supérieure à celle de l'eau de refroidissement du condenseur.

Si l'on projetait de l'eau, on maintiendrait 100° C et 1 atm, ou bien 52° C et 0,5 atm, ou encore 46° C et 0,1 atm, etc. Le tétrachlorure de carbone (substance des extincteurs) donnerait des valeurs analogues, en amenant la machine en dépression.

Si l'on projetait du chlorure de méthyle, on maintiendrait 50° C et 11 atm, absolus, 40° C et 8,7 atm, 30° C et 6,5 atm, ou encore 20° C et 4,8 atm. La machine serait alors en pression.

Pour enlever 100 kW de pertes, on devrait projeter un minimum de 300 cm<sup>3</sup>/s de chlorure de méthyle ; on peut envoyer facilement beaucoup plus.

Il faudrait construire des machines étanches résistant à des différences de pressions externe et interne ; il faudrait des isolants inattaquables par le liquide qui devrait être suffisamment isolant lui-même. On pourrait d'ailleurs refroidir, non pas la machine électrique directement, mais un milieu intermédiaire ; cela serait cependant beaucoup moins avantageux.

Il a été objecté que les pertes de ventilation des machines tournantes augmentent comme la pression ; on ne pourrait ainsi employer 5 atm, ou davantage. Mais on doit remarquer que ces pertes diminuent avec le diamètre, les formules adoptées indiquent la puissance 5 ou 4,8. Si l'abaissement de température permet de diminuer le diamètre pour une puissance et une vitesse angulaires données, on obtiendra un gain sérieux puisque  $0,8^5 = \frac{1}{3}$  et  $0,75^5 = \frac{1}{4}$ . De plus, une grande partie des pertes des machines actuelles est due à leur ventilation très développée, naturelle ou auxiliaire, qui disparaît en grande proportion dans le cas de machines convenablement arrosées qui seraient d'ailleurs beaucoup plus lisses ; la pompe absorberait une puissance négligeable.

De nombreux essais seraient évidemment indispensables (voir *R.G.E.* 4 sept. 1920 ; *Ind. élect.*, 10 fév. 1926).

M. NEU. — Le coût de premier établissement d'une centrale de l'ordre de grandeur de 100 000 kW est d'environ 1 000 f par kW.

S'il s'agit d'assurer des pointes durant annuellement seulement 200 h, et si on compte comme charge d'intérêt et d'amortissement 10 pour cent cela fait donc, rien que pour l'intérêt et l'amortissement, 0,50 f par kilowattheure.

Il est donc intéressant de diminuer cette charge en employant des alternateurs moins coûteux, même si, pendant ces 200 heures, ils absorbent pour leur refroidissement un peu de puissance supplémentaire.

Pour ce qui est de l'objection sur les inconvénients qu'il pourrait y avoir à faire passer l'air de refroidissement d'un alternateur dans une chambre où tombe de l'eau pulvérisée, je pense qu'elle est sans valeur car j'ai employé pendant de longues années des alternateurs où l'air de refroidissement était dépoussiéré par le système Sturtevant consistant à faire passer l'air par une chambre contenant des surfaces où ruisselait de l'eau, cela à la température ambiante.

Or, ce que je propose de faire, consiste à employer de l'eau pul-

vérifiée et refroidie, par exemple à une température maximum de 10° C. Il en résultera que l'air saturé d'eau à +10° C pénétrant dans l'alternateur où il s'échauffera ne pourra jamais y déposer de gouttelettes d'eau.

M. NEU résume son rapport sur « *l'Utilisation rationnelle du vent* » <sup>(1)</sup>.

M. DARRIEUS. — Je désirerais signaler que demain, au cours de la visite des ateliers du Bourget de la Cie Electro-Mécanique, vous pourrez voir en fonctionnement deux moulins aéroélectriques, le premier mis en service il y a deux ans, de 8 m de diamètre et le deuxième plus récent, de 20 m de diamètre. Dans des régions où le vent est intense (10 m:s), ces diamètres correspondraient à des puissances assez considérables, environ 12 kW pour le petit et 80 kW pour le grand ; mais si cet aspect de la question peut, comme l'a indiqué M. Neu, devenir très intéressant, il est peut-être moins immédiat que celui que nous avons visé et qui se borne à l'utilisation des vents modérés, comme on les rencontre le plus couramment en France.

Ainsi, tablant sur un vent moyen de 5 à 6 m:s, nous n'avons pourvu le moulin de 8 m que d'une dynamo de 1 500 W, et celui de 20 m d'une de 10 kW. De sorte que l'utilisation de la puissance installée est assurée de devoir être très bonne dans presque toutes les installations, même loin des côtes, pourvu que le pylône supportant le moulin soit suffisamment élevé.

Tout se ramène en définitive à une question de prix de revient, et si le problème de l'utilisation du vent, soulevé à maintes reprises dans ces dernières années, a fait si peu de progrès, c'est qu'il est difficile de réaliser une installation assez sûre et en même temps assez simple pour n'être pas d'un prix de revient prohibitif.

La constatation de ce qu'ont fait nos devanciers dans les Flandres, il y a déjà deux ou trois siècles, et dont témoignent les tableaux des maîtres hollandais, doit d'ailleurs inciter à la modestie notre science moderne.

En Hollande, on voit fonctionner encore couramment un grand nombre de ces moulins, qui tendent à disparaître malheureusement, dont les ailes présentent de 20 à 30 m de diamètre.

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, t. IX. n° 94, juin 1929, p. 570.



Les difficultés évidentes de montage et de manœuvre d'engins d'aussi grandes dimensions, doivent nous faire admirer l'audace et le talent de leurs constructeurs.

Or, la difficulté principale que présente encore aujourd'hui la construction de moulins aussi grands, est la sécurité. Les anciens moulins étaient surveillés constamment par le meunier car, si dans les plaines des Flandres le vent est assez régulier, quelquefois cependant, il fraîchit brusquement, et il faut que le meunier soit très attentif pour freiner à temps son moulin, et réduire la voilure.

Les moulins modernes doivent être automatiques ; généralement on a recours à divers artifices dont le plus commun est de faire effacer la roue, qui doit quand même être très résistante, surtout quand elle a un certain diamètre, car l'effacement de cette roue par brusque saute de vent est lent, ce qui peut créer un danger.

Une autre solution est l'emploi de pales orientables, mais c'est une complication généralement excessive, à moins d'avoir un très petit nombre de pales et même dans ces conditions le prix de revient risque de s'en ressentir.

Nous avons pensé que les connaissances acquises actuellement en électro-mécanique permettraient de recourir à une autre solution, qui devient possible lorsque l'on commande directement une génératrice électrique, c'est d'employer des pales étroites en petit nombre et tournant très vite. De la sorte le couple se trouve ne dépendre, sensiblement, que de la seule vitesse de rotation, dès que la vitesse du vent atteint une certaine valeur.

Pour les moulins ordinaires à grand nombre d'ailes, les caractéristiques de la puissance en fonction de la vitesse du vent, pour chaque vitesse de rotation, présentent l'allure ci-contre (fig. 3), de sorte que lorsque le vent fraîchit, non seulement la puissance, mais le couple s'élèvent dangereusement, et que, pour les grands moulins, il devient pratiquement nécessaire de les arrêter. En fait, beaucoup de ces moulins, s'ils sont construits pour assurer un service sans risque, n'utilisent pas bien les grands vents, à cause de cette sujétion.

Au contraire, si on emploie des moulins à très faible surface, en ailes étroites tournant rapidement, ce qui est avantageux au point de vue mécanique, on peut en attendre la même puissance que d'un moulin de même diamètre ayant une plus grande surface, tandis que si, à vitesse donnée, la courbe caractéristique de la puissance en fonc-

tion de la vitesse du vent offre au début la même allure, elle s'incurve ensuite vers le bas et présente une longue inflexion horizontale, voire même une chute (fig. 4).

Les choses peuvent être ainsi réglées pour que cette inflexion soit atteinte pour un vent, par exemple, de 6 m:s, et que la puissance

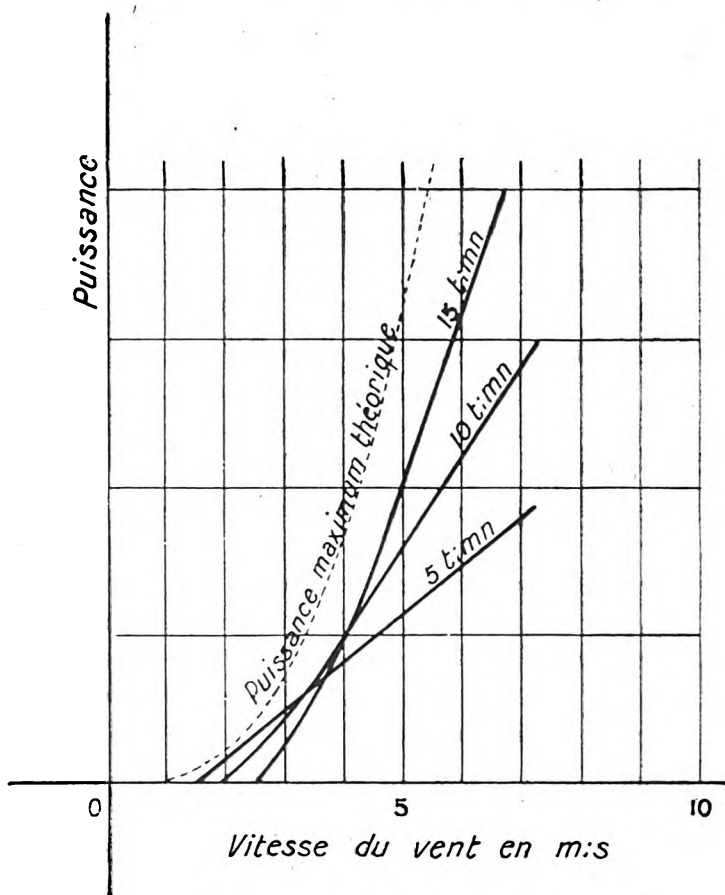


FIG. 3. — Moulin commun à grand nombre de pales et à faible vitesse spécifique.

ainsi obtenue ne soit à nouveau dépassée que par un vent de 12 à 15 m:s qui ne sera guère atteint qu'exceptionnellement.

Il suffit ainsi de rester maître de la vitesse pour l'être en même temps du couple et de la puissance, sans l'aide d'aucun artifice, comme pales articulées ou même mouvement d'effacement de la roue. L'expérience nous a d'ailleurs confirmé l'existence de cette propriété

qui assure à notre système, la simplicité et la sécurité que nous avons recherchées.

M. MATHIVET. — M. Mathivet résume son rapport sur « les Centrales thermiques américaines » <sup>(1)</sup>.

M. K. SOSNOWSKI. — M. Mathivet a examiné ce qui se fait actuellement aux Etats-Unis en fait de Centrales thermiques et il en a tiré

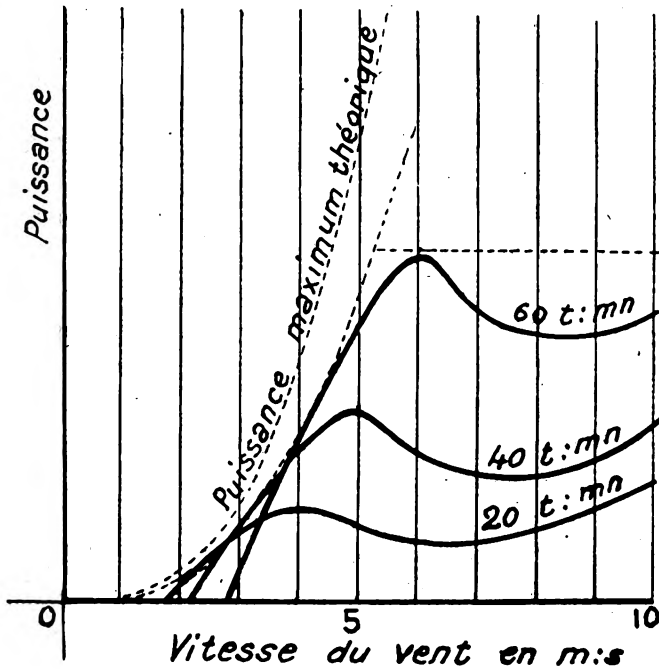


FIG. 4. — Moulin à petit nombre de pales et à grande vitesse spécifique.

des enseignements très intéressants pour l'avenir. Pour voir juste, il faut voir grand. Les Américains s'y conforment, voient et font grand ; on n'a qu'à les en féliciter. Mais nous pouvons dire, sans fausse modestie, et sans crainte d'être démentis par eux, que nous y sommes pour quelque chose. Et voici pourquoi : l'origine des grandes Centrales thermiques est due à la Turbine à vapeur. Tant que nous n'avions à notre disposition que des machines alternatives, à piston,

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, t. IX. n° 97. septembre 1929, p. 927.

nous avons, de ce fait, une limite à la puissance unitaire des groupes électrogènes.

La turbine à vapeur a fait tomber cette barrière.

En qualité de vétéran et pionnier des Turbines à vapeur, je voudrais rappeler quelques souvenirs.

Je ne sais pas s'il se trouve parmi vous, aujourd'hui, quelques témoins de l'époque bien lointaine que je voudrais évoquer.

Il s'agit de plus d'un tiers de siècle.

Je me permets de vous rappeler l'Exposition de la « Société française de Physique » qui a eu lieu en 1894, dans cette même salle où nous nous trouvons réunis aujourd'hui.

J'y avais présenté une toute petite turbine à vapeur, première turbine d'action, conçue par de Laval.

Munie d'un dispositif de complète détente de la vapeur, pour utiliser sa force vive seule, d'un arbre flexible, permettant la réalisation des vitesses vertigineuses à l'époque (30 à 40 000 t.mn, imposés pour ce nouveau mode d'utilisation de l'énergie cinétique de la vapeur) et d'un engrenage, réducteur de vitesse, elle présentait un ensemble aussi original qu'ingénieux.

C'est ce petit appareil, qui ne rencontrait alors que des incrédules, à qui on daignait à peine de reconnaître l'intérêt d'un jouet de Laboratoire, qui a pris un essor formidable, a contribué à révolutionner les applications de la machine à vapeur ; c'est ce petit appareil qui est à l'origine des groupes électrogènes géants, lesquels, seuls, permettent la réalisation de nos Supercentrales modernes, à capacité pour ainsi dire illimitée.

Je me propose de faire le bilan du chemin parcouru depuis lors. Mais je voudrais, tout au moins, constater aujourd'hui que nos prévisions se sont entièrement justifiées :

*de grandes vitesses*, dépassant 30 000 t.mn ;

*de hautes pressions* de vapeur (chaudières de Laval, timbrées à 200 Kg/cm<sup>2</sup> et fonctionnant industriellement, en 1897) ;

*de hautes températures* ;

le tout permettant de réaliser des rendements très élevés et des consommations de combustible, qu'on n'osait même pas espérer.

Et, puisque nous parlons des progrès réalisés dans cette voie par les Américains, il est bon de rappeler qu'ils ont débuté avec les turbines de notre construction.

C'est, en effet, en 1895, que la « Edison Electric Illuminating » de New-York, a installé nos deux turbines de 300 ch qui sont reconnues comme ayant été les premières turbines à vapeur installées en Amérique pour assurer un service public.

Il y a une quinzaine d'années, lors d'une mission dont j'ai été chargé aux Etats-Unis, j'ai pu répondre à l'invitation qui m'a été faite par la Société des Electriciens, pour étudier diverses questions à l'ordre du jour.

Je vous avais alors rapporté les détails complets sur les Grandes Centrales américaines, notamment toutes les données du premier groupe de 35 000 kW qui venait d'être installé à la Centrale de Philadelphie.

Quelques années après, en 1919, j'ai pu compléter mon premier rapport par un nouveau.

Dans mes communications, successivement, je vous avais tracé le tableau des progrès réalisés au point de vue des *rendements thermiques* :

7 à 8 pour cent au début ;

17 pour cent en 1915 ;

20 pour cent en 1919.

Il y a, depuis, de nouveaux progrès.

Alors qu'on dépensait 600 g de charbon par kilowattheure, on arrive à en dépenser actuellement moins de 500 g.

On n'ira encore plus loin, on approchera des consommations théoriques, et c'est tout juste si l'on ne démontrera pas que la théorie s'est trompée.

M. BERGEON. — Je voudrais demander à M. Mathivet s'il lui est possible d'indiquer un prix de revient approximatif du kilowattheure, dans le cas de centrales thermiques installées sur le carreau des mines pour brûler du mauvais charbon. Cette donnée est, en effet, très utile pour étudier si le transport à Paris de l'énergie des centrales du Nord est possible économiquement.

M. MATHIVET. — Je ne puis donner ici que des renseignements d'ordre technique ; on peut, dans des chaudières bien conditionnées, utiliser des combustibles pulvérisés ayant une teneur en cendres de 15, 25 et même 30 pour cent. Sur des grilles mécaniques, on peut aller jusqu'à la teneur de 35 pour cent.

M. RAUBER. — N'ayant pu assister à la communication faite le 5 juin dernier à la Société par M. Mathivet, je n'ai pu me référer qu'au résumé qui en a été donné dans le bulletin de septembre.

Si je puis me borner, avec l'accord de M. Mathivet, à discuter ce résumé, je présenterai quelques observations, sensiblement dans l'ordre d'exposition du résumé.

La communication ne semble pas tenir compte des tout derniers renseignements sur la façon dont cette question est considérée aux Etats-Unis.

Le mouvement en faveur des hautes pressions s'est nettement accru aux Etats-Unis depuis la mise en service des installations d'essais à 85 et 100 kg d'EDGAR-STATION et de MILWAUKEE, à tel point que la Revue Power a cru devoir y consacrer entièrement son numéro du 28 mai 1929.

En dehors des 2 stations ci-dessus et de celle de KANSAS-CITY qui a suivi, on commencé à l'heure actuelle aux Etats-Unis la construction de 4 usines nouvelles destinées à avoir ultérieurement des puissances de 200 000 à 400 000 kW et dont le timbre des chaudières sera compris entre 85 et 100 kg/cm<sup>2</sup>.

Il y a en outre 7 à 8 très grosses usines dont le timbre est compris entre 43 et 57 kg/cm<sup>2</sup>. Certaines d'entre elles marchent depuis plusieurs années.

Pendant longtemps on a considéré aux Etats-Unis que les installations à haute pression seraient chères et ne conviendraient qu'aux usines de base.

L'opinion qui commence à se répandre est que les installations à très haute pression ne seraient pas beaucoup plus chères par kilowatt installé (environ 5 pour cent) que les installations aux pressions ordinaires de 25 à 30 kg/cm<sup>2</sup>, en raison des économies indirectes faites sur tout ce qui n'est pas soumis à la pression. Dans ces conditions, on n'est pas loin de penser que les hautes pressions *seront intéressantes et économiques indépendamment de toute utilisation*.

Chez nous, la pression de 45 kg/cm<sup>2</sup> a été choisie par la C.P.D.E. pour l'extension de son usine d'Issy et tout récemment la Société d'Electricité de Paris a commencé à Saint-Denis la construction d'une usine nouvelle, comportant la pression de 70 kg/cm<sup>2</sup>, la température de 470° C aux chaudières et même des groupes de 50 000 kW à

3 000 t/mn. A ce point de vue, nous ne sommes donc pas trop en retard sur les Américains.

M. MATHIVET. — Tout en maintenant les réserves que j'ai faites dans mon étude au sujet de l'extension de l'emploi des pressions supérieures à 80 kg/cm<sup>2</sup>, je note avec plaisir que nos Sociétés Parisiennes vont faire, à ce sujet, des essais très intéressants.

M. RAUBER. — En ce qui concerne la puissance des groupes, les Américains ont évidemment pu prendre une telle avance du fait des puissances énormes qu'ils ont à mettre en jeu. Il ne faut cependant pas oublier que les groupes dépassant 100 000 kW ne sont encore qu'en très petit nombre.

Je puis indiquer à ce propos que l'Union d'Electricité qui a, depuis 1919, prévu comme groupes normaux les unités de 40 000, puis de 50 000, puis de 55 000 kW, va faire un nouveau pas dans cette voie. Elle envisage 100 000 kW sur un seul arbre, comme puissance des unités dans la deuxième partie de son usine de Vitry-Sud.

Il ne semble pas d'ailleurs que, comme le pense M. Mathivet, la consommation de vapeur de ces groupes très importants soit notablement meilleure que celle des groupes de 50 000 kW.

M. Mathivet semble attribuer aux seuls Ingénieurs Américains, l'emploi de la *circulation d'air en circuit fermé* pour la réfrigération des alternateurs. Je crois devoir rappeler que Gennevilliers est la première grande centrale dans laquelle on ait appliqué systématiquement ce dispositif qui avait été proposé à l'Union d'Electricité par la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques.

M. MATHIVET. — Ceci ne peut que renforcer mon argumentation et je ne puis que souhaiter, avec M. Rauber, que le nombre des Usines Françaises qui suivront, dans l'avenir, l'exemple de la Centrale de Gennevilliers soit de plus en plus grand.

M. RAUBER. — Parlant des grandes chaudières utilisées aux Etats-Unis dans les centrales, M. Mathivet me paraît exagérer un peu l'importance du rôle de M. Murray, l'Ingénieur-Conseil bien connu, auquel on doit les « WATER-WALLS » protection des foyers avec des tubes d'eau faisant partie de la chaudière.

Les grandes chaudières sont certainement d'initiative américaine. Les foyers refroidis par des tubes d'eau leur sont favorables, mais

non indispensables pour obtenir une forte vaporisation. Il existe d'ailleurs plusieurs autres systèmes de protection des foyers aussi estimés que le « Murray walls ».

M. Mathivet a défini un « *indice superficiel* » qu'il obtient en divisant la surface de chauffe d'une centrale par sa puissance en kilowatts et il attribue aux chaudières « MURRAY » la possibilité de descendre cet indice à 0,06 aux Etats-Unis, alors qu'en France nous n'aurions que l'indice 0,10 à 0,18 beaucoup moins favorable.

M. Mathivet a raison de préconiser l'emploi de très grandes chaudières et, comme il regrette qu'en France nous n'allions pas plus de l'avant, je me permets encore de rappeler que dès 1919 l'Union d'Electricité, s'inspirant d'ailleurs des Américains, commandait les premières grandes chaudières (1 400 et 2 100 m<sup>2</sup>) exécutées en France, et cela pour le timbre de 25 kg/cm<sup>2</sup> qui n'était pas encore adopté à l'époque aux Etats-Unis.

Ces chaudières auraient déjà l'indice 0,12 de M. Mathivet. Les commandes faites ultérieurement pour les usines de Gennevilliers et de Vitry-Sud donnent l'indice 0,08 à 0,09 de sorte que nous approchons déjà d'assez près les chiffres américains cités par M. Mathivet.

Puisque M. Mathivet considère cet indice superficiel de 0,06 comme caractérisant le progrès en matière de chaufferie, je puis lui indiquer qu'il existe actuellement sur le marché, une chaudière française construite par la Société BABCOCK et WILCOX qui donnerait l'indice 0,04. *soit encore 33 pour cent de moins que les chiffres américains.* Ce chiffre de 0,04 n'est d'ailleurs pas la limite possible.

En réalité, la puissance possible par mètre carré de surface de chauffe dépend d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels :

- l'importance donnée à la surface directement rayonnée ;
- le chiffre de la pression, les pressions élevées nécessitant moins de calories pour la vaporisation ;
- l'importance du réchauffage de l'eau d'alimentation par la vapeur prélevée aux turbines qui peut diminuer notablement les calories à transmettre aux chaudières ;
- sans compter d'autres influences, de sorte que cet indice ne suffit pas à lui tout seul pour caractériser la qualité d'une centrale.

M. Mathivet a le tort, à mon avis, d'en tirer une comparaison de la *consommation de charbon par kWh* obtenue aux Etats-Unis et dans nos grandes centrales françaises. *L'indice superficiel caractérise la*



*productivité*, et ne peut guère servir à caractériser la consommation par kWh.

Si l'on suivait M. Mathivet dans cette voie, on serait conduit à attribuer à une centrale équipée avec la chaudière française dont je parlais ci-dessus, une consommation de charbon de

$$0,04 \times 7 = 0,280 \text{ kg par kilowattheure}$$

calcul qui n'est évidemment pas justifié.

M. MATHIVET. — Ici encore, M. Rauber ne peut citer que la Centrale de Gennevilliers comme usine ayant réalisé un faible indice superficiel de chaudières. Contrairement à l'avis de M. Rauber, je persiste à penser que c'est avec des chaudières de faible indice superficiel que l'on pourra réaliser les plus grosses productions de vapeur par kilowatt produit ; quant au calcul de la consommation par kilowattheure, je n'en ai parlé qu'incidemment et simplement pour fixer les idées.

M. RAUBER. — M. Mathivet semble attribuer, sans d'ailleurs le dire expressément, la paternité du réchauffeur d'eau d'alimentation par prélèvement de vapeur aux turbines, aux Ingénieurs américains. Il me sera permis de rappeler ici que l'usine de Gennevilliers avait, dès 1919, commandé son matériel pour l'application de 2 soutirages par turbine, alors qu'aux Etats-Unis on en était encore au réchauffage de cette eau par des « House-turbines ». Seule, à notre connaissance, à la même époque, la centrale anglaise de North-Tees en avait décidé l'application.

M. MATHIVET. — Je n'ignore pas qu'actuellement les grandes Maisons de construction européennes pratiquent le soutirage de vapeur pour réchauffer l'eau d'alimentation ; je me suis simplement borné, dans mon tableau, à rappeler que les Américains pratiquaient également ce soutirage de vapeur dans d'excellentes conditions.

M. RAUBER. — Je voudrais terminer en disant quelques mots du dispositif envisagé par M. Mathivet pour produire de l'énergie dans les mines du Nord et la transporter dans la région parisienne.

Rien n'empêche de poser en principe que telles dispositions techniques qui seront envisagées pour produire économiquement l'énergie à la mine, puissent également être envisagées dans la Région

Parisienne, notamment la pression, la température de la vapeur, la puissance des unités, etc...

Mais l'usine à la mine sera toujours inférieure à celle de la Région Parisienne du fait du manque d'eau pour la circulation. Il n'est pas exagéré de chiffrer à 5 pour cent le supplément de *prix d'établissement* nécessaire pour établir les réfrigérants et leurs accessoires.

Il faudra, de plus, considérer comme faisant partie de la centrale, les lignes de transport d'énergie avec les postes élévateurs et abaisseurs de courant qui permettront d'amener l'énergie à la Région Parisienne.

On ne peut guère compter à moins de 20 à 25 pour cent du prix de la centrale, le prix de ces lignes et postes de sorte que, *au total, le coût de l'installation de production d'énergie doit être estimé, toutes choses égales, à 25 pour cent de plus que dans la Région Parisienne*, d'où une majoration du même taux des charges financières.

Concernant les *frais de production*, il faut envisager une consommation supplémentaire de calories d'au moins 5 à 6 pour cent, du fait du vide moins élevé qu'on obtient forcément avec les réfrigérants.

Les autres dépenses de production seront du même ordre dans les deux cas.

Il faudra, en outre, compter 5 pour cent de pertes en lignes et de transformation sur l'énergie transportée.

En résumé, envisager la production sur le carreau des mines du Nord de l'énergie électrique nécessaire à la Région Parisienne, revient à grever le prix du kilowattheure *de 10 pour cent de plus comme dépense en calories et de 20 à 25 pour cent comme charges financières*, ce qui paraît anti-économique au premier chef.

Encore ceci suppose-t-il la fourniture par les Mines d'un courant ayant la même utilisation que les réseaux de la Région Parisienne. Or, il est difficile de concevoir que les entreprises de cette région, ayant leurs propres usines à garder en service et ayant déjà des accords avec des Sociétés hydro-électriques du Massif Central, puissent laisser fournir aux Mines du Nord, supposées reliées à Paris, un courant à forte utilisation. Le prix du kilowattheure doit donc être grevé de fortes charges financières, de sorte qu'on ne voit pas comment cette fourniture serait économiquement possible.

Il resterait d'ailleurs la question de *sécurité* de l'alimentation par

des usines placées à grande distance. Quels que soient les progrès faits dans cet ordre d'idée, il est difficile de penser que la Région Parisienne puisse s'accommoder d'un tel dispositif pour la majeure partie de ses besoins d'énergie.

M. MATHIVET. — Les chiffres que M. Rauber avance pour soutenir qu'il est plus avantageux de transporter le charbon des houillères dans les Centrales citadines que de transporter l'énergie électrique produite dans des Centrales de houillères me paraissent tout à fait discutables. Ils ne reposent d'ailleurs sur aucun calcul précis.

Or, ce problème vient d'être traité très complètement à l'occasion de l'alimentation en énergie électrique de la ville de Liverpool, par les ingénieurs anglais, et le résultat de leur calcul a été exposé dans le numéro du 9 août 1929 de l'*Engineering*.

Il résulte du calcul des Ingénieurs anglais, que pour un charbon produisant le kilowattheure avec 0,650 kg, il est plus avantageux de transporter l'énergie, si le charbonnage se trouve à plus de 50 km de la ville.

Ce n'est qu'en brûlant dans la Centrale de ville un charbon donnant le kilowattheure avec 0,400 kg qu'il est plus avantageux de transporter le charbon.

Ainsi donc, c'est une grave erreur de transporter des charbons sales ou même à teneur en cendres moyennes et ce n'est qu'à la condition de transporter des charbons très propres (3 à 6 pour cent de cendres) que les centrales de ville peuvent justifier leur existence.

Dans cette étude des ingénieurs anglais, M. Rauber pourra constater que tous les coefficients qui entrent dans le problème ont été comptés et que, même en admettant qu'en France les tarifs de transport de charbon soient moins élevés qu'en Angleterre, l'équation économique du problème se résoudra toujours en faveur de la centrale installée près des charbonnages.

Nous ajouterons que nous considérons que la liaison des lignes à haute-tension provenant des chutes d'eau du Centre de la France est une nécessité nationale et que nous avons le devoir, tout comme en Angleterre et en Allemagne, de doter la France d'un réseau national à haute-tension destiné à faciliter les échanges d'énergie électrique à réaliser la traction électrique des chemins de fer et à alimenter les villes principales.

En ce qui concerne la capitale, il ne s'agit pas du tout, dans notre esprit, de supprimer les Centrales existantes, mais d'apporter à ces Centrales, comme le fait déjà la Centrale d'Eguzon, un secours important au moment des heures de pointe.

Nous espérons que, dans un avenir prochain, le programme que nous esquissons ci-dessus se réalisera peu à peu et nous sommes persuadés qu'à ce moment, les centrales de la Région Parisienne seront les premières à se féliciter du secours très intéressant que leur apporteront les Centrales des Charbonnages.

M. GENISSIEU. — Je voudrais attirer l'attention sur une question particulièrement importante dans un pays comme la France, c'est la question de l'eau nécessaire aux centrales thermiques pour la condensation. Quand on compare à ce point de vue les Etats-Unis et la France, on voit que la situation est différente du tout au tout.

Les Etats-Unis sont une grande partie d'un grand continent, l'Europe sur la même surface est une péninsule dont la France occupe un isthme resserré. Le résultat est qu'il n'y a pas de fleuves en France, il n'y a que des petits cours d'eau et M. Mathivet a pu voir que ces centrales dont il nous parle sont situées sur les bords de fleuves énormes ou même sur des lacs, aussi bien à New-York qu'à Chicago, ou Détroit, ou Philadelphie, de fleuve comme il n'en existe pas chez nous.

Actuellement, en France, les centrales d'importance moyenne, qui n'ont pas à elles seules la puissance d'au moins 40 ou 50 000 kW nécessaires à un groupe vraiment moderne, s'éteignent les unes après les autres. Je viens de m'occuper la semaine dernière d'une usine de 18 000 kWh qui travaillait à plein et qui est alimentée par l'eau d'un canal. On est en train de fermer cette usine et de terminer une ligne de transport qui doit permettre cette fermeture. Ces derniers temps quand l'usine travaillait à plein, l'eau du canal était à 39° C.

En l'apprenant, par déformation professionnelle, je me suis demandé quel était l'état d'esprit de l'ingénieur de la navigation du canal. Mais, de son côté, l'ingénieur de l'usine me disait que dans ces conditions-là la centrale elle-même ne peut plus travailler, le vide ne se fait plus.

Les intérêts privés et publics sont donc d'accord pour remplacer des usines comme celles-là et pour chercher des endroits où il y a un peu plus d'eau disponible.

Le lorg de la Seine, un des principaux fleuves de France, quelle est la situation actuelle ? On y relève des débits d'étiage — rares il est vrai — qui peuvent tomber à  $30 \text{ m}^3$  par seconde. On peut admettre que, pour faire un kilowattheure il faut consommer  $1/3$  de mètre cube par seconde. Mettons que les  $30 \text{ m}^3$  de la Seine arrivent à faire 100 kWh par seconde, soit 360 000 kWh par heure, en étiage, c'est-à-dire en août et septembre. La puissance nécessaire dans la Région Parisienne dépasse aujourd'hui 360 000 kW, même dans ces mois-là. En été, le débit de la Seine entre tout entier dans les condenseurs.

D'autre part, l'énergie consommée va en doublant tous les six ans, avec une utilisation qui ne s'améliore guère et qui, parfois, diminue. Dans ces conditions-là, qu'est-ce qu'on fera dans quelques années, quand le débit de la Seine en été passera deux ou trois fois dans les condensateurs ? On atteindra des températures impossibles pour tous les intérêts en cause.

Enfin, dans la région du Nord, quelle est la situation ? Elle est plus mauvaise encore, parce que là, il n'y a même pas de fleuve comparable à la Seine. Le fleuve le plus important est la Lys, et la seule centrale qui soit de l'ordre de 100 000 kW s'est installée sur la Lys à son point le plus bas, c'est-à-dire à la frontière belge, à Comines.

Il me paraît très difficile d'arriver à établir en France des usines comparables aux centrales américaines qui totalisent 5 ou 600 000 kW dans une seule salle des machines et un seul bâtiment de chauffe.

Il y a bien des grands fleuves en France, le Rhin et le Rhône, mais loin des mines ou dans des situations géographiques peu favorables au point de vue de la sécurité complète de la production.

Est-ce qu'on peut compter utiliser des réfrigérants pour des centrales pareilles ? La plus grande batterie de réfrigérants que j'aie vue est en Haute-Silésie, dans l'usine polonaise de Chorzow. Il n'y a pas de fleuve. Il y a des canaux qui répartissent l'eau dans toutes les usines thermiques, en quantité tellement faible qu'on est obligé d'installer des réfrigérants ; d'ailleurs, le canal est coupé par la nouvelle frontière de Haute-Silésie, et les Polonais sont en train de faire des adductions d'eau pour dériver des rivières vers ce pays.

Quoi qu'il en soit, des batteries de réfrigérants dans une usine de 50 000 kW, c'est formidable. Si vous voulez en installer pour une usine 10 fois plus forte, pour celles de la Région Parisienne 20 ou 30

fois plus fortes, je me demande où vous trouverez les dizaines d'hectares de terrain nécessaire au voisinage des usines. Je me demande même si vous pourrez les trouver dans la région du Nord, à côté des mines.

Il y a donc en France un problème très difficile à résoudre, et nous arrivons à une époque où l'on commence à s'apercevoir que ce problème est grave.

En ce qui concerne les autres idées exposées par M. Mathivet, il y a deux réserves à faire. D'abord, en ce qui concerne la comparaison du transport de l'énergie par lignes électriques et par wagons de charbon. Les chemins de fer ont des tarifs purement artificiels dus à des considérations d'ordre politique.

Les Compagnies de chemins de fer sont en déficit, si vous entendez les mots dans leur sens véritable, c'est-à-dire, si on tient compte de toutes leurs charges de capital, et de la nécessité de donner un intérêt raisonnable aux capitaux engagés. Si, d'ailleurs, vous voulez prendre, non pas le tarif payé, mais le prix de revient exact, personne ne sait ce que c'est. Un exploitant qui fait venir du charbon, ne connaît que ce qu'il paie aux chemins de fer, mais quand on s'occupe de la question à un point de vue général, il faut en voir tous les aspects. Ce que l'exploitant ne paie pas, c'est le contribuable qui le paie.

Il y a une autre réserve à faire. M. Mathivet a donné une image du réseau national français avec certaines lignes à 200 000 V. Cette conception ne correspond pas à ce qui est en train de se réaliser ; on cherche à réunir les centres de production aux centres de consommation, et il s'introduit des liaisons qui ne sont pas tout à fait celles de M. Mathivet. Mais sur cela je n'éprouve pas le besoin d'insister, cela pourrait me conduire trop loin. Je me borne à indiquer la question.

M. MATHIVET. — J'insiste sur ce que je disais, qu'il faut faire des groupes de 30 000 kW et fournir l'eau avec des forages pour 100 000 ou 200 000 kW.

Vous disiez que pour une usine puissante, l'installation réfrigérante est énorme. Je connais cependant des batteries de réfrigérants en béton de 60 000 kW, dont le faible encombrement vous étonnerait.

M. GENISSIEU. — Par rapport à l'encombrement du reste de l'usine, quelle en est l'importance ?

M. MATHIVET. — Avec la chaufferie, cela représente peut-être 25 ou, au plus, 30 pour cent de l'ensemble ; vous seriez du reste étonné de la facilité d'établissement des forages. Pour 200 000 kW, nous avons 3 forages, chacun de 150 m<sup>3</sup> à l'heure.

Nous avons des puits donnant de 800 à 1 000 m<sup>3</sup>, mais nous ne nous en servons pas pour faire de l'énergie.

M. GENISSIEU. — Je demanderai, dans ces conditions-là pourquoi les centrales de la Région Parisienne n'ont pas installé de réfrigérants ? Si elles prennent l'eau à la rivière, c'est qu'elles ont trouvé la solution plus pratique et plus économique. S'il est techniquement possible de faire la condensation avec de pareils réfrigérants, il est probable que c'est plus cher, je ne sais du reste pas dans quelles proportions. Si on constate que la température de la Seine est trop haute, on se résignera peut-être au réfrigérant, mais on le considérera comme une dure nécessité.

M. MATHIVET. — Et peut-être dans la suite verra-t-on qu'on s'est trompé.

M. NEU. — M. Rauber a dit tout à l'heure que dans les centrales les frais de premier établissement étaient indépendants de la pression adoptée. Mais alors je dois lui faire un amical reproche car, ayant eu il y a quelques mois le plaisir de lui faire remettre commande de chaudières pour lesquelles on hésitait entre les deux pressions de 25 et de 35 kg/cm<sup>2</sup>, le prix de l'installation à 35 kg/cm<sup>2</sup> était notablement plus élevé que celui de l'installation à 25 kg/cm<sup>2</sup>.

M. Mathivet a indiqué comme pression minimum le chiffre de 35 kg/cm<sup>2</sup>. La détermination de ce minimum est une question plus complexe qu'on ne peut le penser au premier abord, car le choix est dicté par la résultante de 5 ou 6 variables dont une des plus importantes est le coefficient d'utilisation annuelle.

Les installations à pression élevée étant plus chères, il faut pour se décider, connaître ce coefficient d'utilisation annuelle ; de plus, cette détermination de la pression optimum dépend encore du prix du charbon et du prix de l'argent.

Le jour où on pourra émettre des obligations à 3 pour cent, on pourra avantageusement employer des chaudières à 80 kg ; mais tant qu'on paye l'argent à 6 pour cent, il peut être opportun d'adopter des pressions plus basses. On peut dire que l'adoption de la pression optimum est quelque peu fonction du taux d'escompte de la Banque de France.

M. MATHIVET. — C'est exact.

M. NEU. — Maintenant, je voudrais dire un mot des réfrigérants. On a critiqué les installations utilisant des réfrigérants, en disant qu'elles donnent un moins bon vide que celles utilisant de l'eau courante de rivière.

Ce n'est pas tout à fait exact car, quand on prend de l'eau dans une rivière sale telle que la Seine, on a beau employer des grilles très perfectionnées, cela n'empêche pas que l'eau entrant dans les condenseurs soit boueuse, et ils se salissent assez vite. Cet encrassement augmente la chute de température entre l'eau et la vapeur ; comme le nettoyage d'un condenseur est une opération ennuyeuse, on ne le fait que quand il est réellement très sale ; pendant ce temps le vide est moins bon et on perd l'avantage de la fraîcheur de l'eau courante.

Au contraire, dans les installations à réfrigérants, la quantité d'eau à ajouter au circuit de condensation étant des plus minimales, on peut faire cet apport avec de l'eau filtrée et par conséquent propre, et le vide du condenseur reste constant.

Je demande donc qu'on ne crie pas haro sur les réfrigérants qui, dans de très nombreuses circonstances peuvent rendre les meilleurs services.

M. BOUCHEROT. — Je crois que pour discuter ces questions, nous restons trop dans le domaine exclusif de l'Electricité. J'ai déjà eu l'occasion de le dire au Conseil National Economique, dont je suis membre, à la suite d'un rapport de M. de Peyerhimoff, Président du Comité des Houillères, sur l'emploi de la houille. Il exprimait l'avis qu'en ce qui concerne l'économie houillère, la production de l'Electricité est parfaite et qu'on ne pouvait faire mieux. Or, ce n'est pas ma conviction. J'ai adopté à cet égard les idées d'un de nos collègues qui voit les choses tout à fait autrement.



Si vous considérez la consommation de charbon faite en France pour la production de l'électricité, ce n'est qu'une infime partie de la consommation totale de charbon, c'est en particulier une infime partie de la consommation de charbon par les industries de chauffage. Si l'on veut envisager l'avenir économique, je me demande si l'on doit rester uniquement dans le domaine de l'électricité. M. De Coninck dit que l'électricité doit être un sous-produit de la chaleur. Il exagère peut-être, mais il est certain qu'à l'heure actuelle les centrales rejettent les  $\frac{4}{5}$  de la chaleur dans la rivière, ou bien elles font tout ce qu'elles peuvent pour s'en débarrasser autrement, avec les réfrigérants quand elles n'ont pas de rivières. Est-ce que la solution de l'avenir ne serait pas de combiner les industries électriques avec des industries de chauffage ? Puisque la consommation de celles-ci en charbon est très supérieure à celle des industries électriques, il serait peut-être possible de les combiner, et d'améliorer les conditions économiques.

M. BERGEON. — Certaines mines du Nord veulent faire de l'électrochimie avec l'énergie de leurs centrales. Si elles peuvent faire de l'électrochimie, c'est que leur prix de revient du kilowattheure doit être assez bas. Elles pourraient donc également faire du transport d'énergie. Mais, à l'heure actuelle, le coefficient d'utilisation à Paris est trop faible pour que l'on puisse obtenir un très bon rendement dans les centrales et un prix convenable pour le transport de l'énergie. Je suis persuadé que lorsque le chauffage sera suffisamment utilisé, les mines du Nord pourront alors faire du transport d'énergie, dans de très bonnes conditions, avec une marche presque continue de plus de 4 000 heures.

Le chauffage électrique paraît actuellement beaucoup trop coûteux pour pouvoir être très répandu. C'est une erreur et déjà, à Paris même, il commence à être très apprécié : par ses avantages, il finira par s'imposer comme s'est imposé l'éclairage électrique, que personne ne songerait actuellement à abandonner même si le pétrole était distribué gratuitement.

M. RAUBER. — Le volume d'eau de la Seine disponible pour la condensation est évidemment limité, quoi qu'il en soit les étiages indiqués tout à l'heure par M. Génissieu sont exceptionnels. Si l'on a eu des débits de cet ordre cet été, il n'en est pas moins vrai que, pen-

dant la plus grande partie de l'année, le débit de la Seine est de l'ordre de 70 à 80 m<sup>3</sup>-s., c'est-à-dire supérieur à ce qu'il faudrait pour faire bien des centaines de milliers de kilowatts. L'eau de la Seine est du reste utilisée plusieurs fois.

Les perfectionnements de la technique ont aussi pour effet de diminuer la quantité d'eau de condensation nécessaire. Avec l'augmentation des pressions et températures de vapeur qui sont, dès maintenant admissibles, on peut très bien augmenter de 50 pour 100 ou davantage la puissance possible.

Enfin, M. Boucherot rappelait tout à l'heure que le chauffage urbain va bientôt commencer à distribuer de la chaleur à Paris, et qu'il serait de nature à diminuer, si l'on peut dire, la fatigue de la Seine, au point de vue réfrigération.

Je terminerai en répondant d'un mot à M. Neu, qui a émis tout à l'heure des doutes sur l'efficacité pratique des condensations fonctionnant avec l'eau de rivières très sales. A l'usine de Gennevilliers, qui utilise bien l'eau la plus sale qu'il soit possible d'imaginer, on arrive en exploitation à moins de 1 pour 100 près du vide théoriquement possible pour la température de l'eau. C'est rassurant, quant à l'efficacité comparée d'une rivière avec les réfrigérants.

M. DARRIEUS. — Sans être en mesure de discuter en détail les conclusions de M. Rauber, je pense qu'il a sous-estimé les possibilités du transport d'énergie qui, connues déjà en Amérique, se manifesteront d'autant mieux que l'utilisation actuelle de 2 500 heures des réseaux ira en augmentant.

Les constructeurs américains ont signalé justement avec quelque amertume, que, depuis trois ans il leur était commandé moins de matériel, parce que les exploitants avaient tourné tous leurs efforts vers une politique de construction de lignes et d'utilisation de leurs réseaux. Quand nous en serons à ce point en France, sans doute justifierons-nous aussi les interconnexions à grande distance et le bien fondé de ce qui, pour les électriciens, est une intuition, à savoir que le transport de l'énergie est plus économique par fil que sur rail.

M. DE PISTOYE présente son rapport sur « *le nouveau type de moteur asynchrone compensé* » (1).

---

(1) Ce rapport a paru dans la *R. G. E.* du 4 janvier 1930.

M. DARRIEUS. — Est-ce que les deux démonstrations présentées pour l'annulation de l'induction mutuelle entre les bobinages sont toutes deux nécessaires ? Car si le bobinage à quatre pôles n'induit aucune tension dans celui à deux pôles, le caractère réciproque de l'induction mutuelle ( $M_{24} = M_{42}$ ) entraîne nécessairement la proposition inverse ?

M. DE PISTOYE. — Prenons par exemple un moteur à 6 pôles avec champ d'excitation à 2 pôles. Faisons un bobinage à 2 pôles à pas raccourci de un tiers ; le champ à 6 pôles n'induit aucune force électromotrice dans ce bobinage bipolaire. Mettons maintenant les bobines de notre bobinage à 6 pôles trois par trois en parallèle ; nous aurons constitué un court-circuit pour le champ à 2 pôles, puisque les bobines en parallèle sont placées à  $120^\circ$  l'une de l'autre, dans ce champ. Il y a donc induction du champ à 2 pôles dans le bobinage à 6 pôles, sans qu'il y ait induction du champ à 6 pôles dans le bobinage à 2 pôles.

Il se produit même de ce fait, une petite difficulté pour les gros moteurs à basse tension, car on n'a pas le droit de faire certaines mises en parallèle de bobines permises pour les moteurs ordinaires. Ainsi, pour les moteurs à 4 et à 6 pôles, on ne peut mettre plus de deux circuits en parallèle, à moins de constituer des moteurs à 4 ou à 6 pôles par deux ou trois bobinages bipolaires juxtaposés, ce qui introduit certaines complications.

M. LE MONNIER. — D'après ce qu'on nous a dit, c'est à partir du modèle à 6 pôles que ces moteurs deviendraient intéressants. Pour les modèles à 2 et 4 pôles, l'enroulement d'excitation serait plus encombrant.

M. DE PISTOYE. — Les moteurs à 2 ou 4 pôles sont aussi avantageux que ceux à 6 ou à 8 pôles : la vitesse relative du champ d'excitation par rapport au rotor est la même à 2 ou à 6 pôles, à 4 ou à 8 pôles, et on a besoin d'une puissance d'excitation moindre à 2 ou à 4 pôles qu'à 6 pôles. Toutes les combinaisons de polarités sont à peu près également intéressantes.

M. BUNET. — Quel rendement a-t-on par rapport à un modèle asynchrone ?

M. DE PISTOYE. — On perd un ou deux points sur le rendement à pleine charge.

M. BUNET. — Et à quart de charge ? Je vous pose la question parce que dernièrement j'ai été consulté par quelqu'un qui voulait remplacer des moteurs asynchrones ordinaires par des moteurs à collecteur dont le facteur de puissance est presque égal à 1. Son producteur de courant lui faisait payer la puissance réactive, et quand il eut posé ses moteurs, il payait plus cher qu'avant parce qu'il marchait souvent à faible charge, et que le rendement baissait. En fait, ces moteurs étaient mauvais.

M. DE PISTOYE. — A vide on perd un peu plus, car la perte par excitation s'ajoute aux pertes à vide habituelles des moteurs asynchrones. Ceci est général pour tous les moteurs compensés. Du moment qu'on laisse des balais en circuit sur des bagues et sur un collecteur, on a des pertes en ces points, pertes que l'on évite sur les moteurs ordinaires en relevant les balais. Mais la perte supplémentaire consentie de la sorte est variable suivant la tension du secondaire du moteur considéré. Si le rotor du moteur était bobiné pour 30 V à l'arrêt, comme la chute de tension aux balais est d'environ 2 V, on aurait une perte de  $\frac{2}{30}$  soit de 6,7 pour 100 aux balais. Si, au contraire, le rotor est bobiné pour 500 V, la perte est de  $\frac{2}{500}$ , soit de 0,4 pour 100. Pour les moteurs à collecteur, on est souvent obligé, pour des considérations de commutation, de bobiner le rotor à très basse tension. Pour les moteurs compensés, il n'en est pas de même ; on adopte des tensions de rotor assez élevées.

En pratique, si pour un moteur asynchrone ordinaire on a 900 W de pertes à vide, pour un moteur compensé de même puissance, à la même vitesse, on a 1 100 W environ. Pour de gros moteurs, la différence est encore plus faible.

M. BUNET. — Dans les moteurs que j'ai vus, la différence de rendement était de 8 à 10 pour 100 au-dessous de celui du moteur asynchrone ordinaire, à cause du collecteur, du bobinage, de l'excitation, etc...

M. GRATZMULLER. — On arrive facilement à 500 W pour 40 ou 50 ch.

M. LE MONNIER. — Quand il s'agit d'un moteur qui fonctionne à vide ou à faible charge, la production de puissance réactive correspond à une dépense supplémentaire nuisible, à moins qu'il ne soit utilisé à compenser d'autres moteurs. C'est une question d'organisation générale de l'installation ; mais le rendement *propre* du moteur, si l'on tient compte de tout ce qu'il fournit, tant en puissance active, qu'en puissance réactive, est parfaitement comparable à celui du moteur asynchrone ordinaire.

M. DE PISTOYE. — A vide, un moteur étudié pour avoir un facteur de puissance égal à l'unité à pleine charge, débite un courant réactif en avance égal à un cinquième ou à un sixième de son courant de pleine charge.

---

Séance du Mardi 22 Octobre 1929.

---

**2° SECTION. — ÉCLAIRAGE. — CHAUFFAGE.  
RADIATIONS DIVERSES.**

---

- 1° Présentation du rapport de M. DARMOIS sur l'éclairage par les tubes luminescents. — M. LEPAPE: purification des gaz rares; séparation de ces gaz les uns des autres; potentiels d'ionisation; cohésion diélectrique. — M. LEBLANC: purification industrielle de l'argon. — M. LAPORTE: liaison entre la cohésion diélectrique des gaz rares et les coefficients d'absorption des électrons dans ces gaz, p. 266.
- 2° Discussion du rapport de M. TRUFFAUT sur la croissance des végétaux en lumière artificielle. — M. HENRY: définition du rendement. — M. LEBLANC: comparaison de l'énergie ultraviolette du soleil et d'une lampe Cooper Hewitt. — M. DARMOIS: suggestion d'emploi d'une lampe à vapeur de mercure en quartz avec son écran en feuille de verre très mince, p. 274.
- 3° Présentation du rapport de MM. J. DOURGNON et P. WAGUET sur l'optique des surfaces diffusantes, p. 276.
- 4° Présentation du rapport de MM. J. DOURGNON et P. WAGUET sur l'état actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles. — M. Roux: danger d'éblouissement d'un disque de 20 cm avec une brillance de 1,5 bd/cm<sup>2</sup>; répartition de l'éclairage sur la route, p. 277.

Présidence de M. DARMOIS

*Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris*

M. DARMOIS cède momentanément la présidence et présente son rapport sur « l'éclairage par les tubes luminescents » <sup>(1)</sup>.

M. LEPAPE présente la note suivante sur « la purification des gaz rares et sur leur cohésion électrique ».

Les gaz rares constituent, ainsi que vous le savez, une famille très homogène formée par les éléments suivants: Hélium, Néon, Argon, Krypton et Xénon. Ces gaz sont caractérisés par une propriété com-

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, t. IX, n° 98, octobre 1929, p. 1046.

mune très curieuse, leur inertie chimique. Il paraît impossible de les combiner, soit entre eux, soit à n'importe quel autre élément.

Pour purifier ces gaz, on peut : 1° les séparer en bloc des gaz ordinaires ; et 2° les séparer les uns des autres.

Pour isoler des gaz ordinaires le mélange global des gaz rares, on utilise leur inertie chimique. Les gaz ordinaires seront combinés à des substances susceptibles de les fixer sous forme de composés non dissociables et le résidu gazeux sera formé par le mélange des gaz rares.

1° Cette première purification est réalisée d'une façon très commode et très complète au moyen du calcium métallique. Dans un appareil étanche, construit tout en verre soudé, on introduit différents réactifs, de l'anhydride phosphorique, — que doit contenir tout appareil en verre, lorsqu'on veut maintenir un vide poussé — et de la potasse fondue, pour dessécher et absorber le gaz carbonique, puis du calcium en fines râpures, chauffé dans un tube en verre peu fusible (verre d'Ina ou verre Pyrex) auquel fait suite un tube à oxyde de cuivre. Le calcium absorbe tous les gaz ordinaires. Cependant, à la température à laquelle on est obligé d'opérer (rouge sombre) l'hydrure de calcium est partiellement dissocié, dégageant ainsi de l'hydrogène que l'on n'arriverait pas à fixer. Le but du tube à oxyde de cuivre est d'éliminer cet hydrogène. Le tube d'oxyde de cuivre est enfin suivi d'un nouveau tube à anhydride phosphorique. On réalise un circuit fermé dans lequel on place un organe de circulation des gaz (trompe à mercure, par exemple).

En laissant circuler le mélange gazeux dans l'appareil pendant un temps convenable, quelques heures en général, on arrive à une pureté spectrale parfaite du mélange des gaz rares ;

2° Pour séparer les gaz rares les uns des autres, on utilisera une méthode physique comme, par exemple, l'absorption des gaz par le charbon de noix de coco à basse température. Cette méthode, indiquée en 1904 par Dewar, est d'application extrêmement commode au laboratoire.

Elle consiste à faire passer le mélange des gaz rares dans un tube contenant des petits fragments d'un charbon préparé avec l'écorce de noix de coco et qu'on refroidit à différentes températures.

Pour obtenir de l'hélium pur, il faut refroidir le charbon de noix de coco à  $-183^{\circ}$  C. Lorsqu'il s'agit d'hélium ou même de néon, il

est inutile de passer par la purification chimique. Le simple passage de ces gaz sur le charbon de noix de coco suffit pour les séparer, non seulement des autres gaz rares, mais également de tous les gaz ordinaires, sauf si l'hydrogène est abondant. S'il s'agit de séparer l'hélium du néon, il faut employer une grande quantité de charbon refroidi dans l'azote liquide et ne pas faire une dépression trop grande sur le tube à charbon.

Pour obtenir de l'hélium rigoureusement privé de toute trace de néon, le procédé consisterait à chauffer des minerais radio-actifs.

Toutes les autres sources d'hélium contiennent du néon qu'on n'arrive pas à éliminer d'une façon complète.

Quant au néon, quoiqu'il soit peu absorbable par le charbon refroidi, il l'est suffisamment pour qu'on puisse le séparer de l'hélium et des autres gaz. On commence par en séparer l'argon, en fixant ce gaz sur le charbon refroidi à  $-183^{\circ}$  C et en faisant le vide complet. On dégage ainsi la totalité du néon et de l'hélium. Pour séparer ensuite le néon de l'hélium, on fractionne les gaz sur le charbon à  $-183^{\circ}$  C en éliminant chaque fois la fraction légère. On peut obtenir de la sorte du néon tout à fait pur.

Pour l'argon, il faut, pour éliminer les gaz ordinaires, recourir au calcium. On peut ensuite isoler l'argon, d'une part, du néon et, d'autre part, du krypton et du xénon par fractionnement sur du charbon refroidi au voisinage de  $-100^{\circ}$  C. C'est une méthode extrêmement laborieuse. Il est difficile d'obtenir de l'argon rigoureusement exempt des autres gaz rares.

On obtiendra le krypton pur en multipliant les fractionnements sur le charbon refroidi, mais les températures auxquelles on opérera sont plus élevées.

Enfin pour le xénon, la purification consistera à fractionner le gaz brut par passage sur le charbon refroidi à  $0^{\circ}$  C environ et à conserver les fractions de queue.

Mais ces purifications exigent toujours des fractionnements répétés pour obtenir des gaz rigoureusement purs. L'indice de pureté est donné par l'examen spectral.

A ce sujet, il faut remarquer que, dans les mélanges gazeux auxquels on a affaire ici, le spectre qui tend à dominer est celui des gaz à potentiel d'ionisation le plus faible. Les potentiels d'ionisation des



gaz rares sont les suivants en volts : Hélium 24,5, Néon 21,5, Argon 15,2, Krypton 12,7, Xénon 10,9.

Je rappellerai que le potentiel d'ionisation est la différence de potentiel d'où doit tomber un électron pour ioniser un atome normal. Lorsque la décharge illumine un mélange d'hélium et de néon, même contenant de faibles proportions de néon, on verra surtout le spectre du néon, le potentiel d'ionisation de ce gaz étant plus faible que celui de l'hélium.

Pour rechercher l'hélium dans le néon, même en présence d'une proportion importante d'hélium, il faut employer des décharges puissantes, obtenues en plaçant un condensateur de dérivation aux bornes du transformateur, et une coupure à étincelles dans le circuit.

Ces mêmes principes doivent être appliqués aux mélanges des autres gaz rares. Quand on prépare du krypton pur, par exemple, il est très difficile d'y déceler les dernières traces d'argon. Dans ce cas, je recherche une certaine raie indigo du spectre de l'argon qui est particulièrement sensible.

Cette question des potentiels d'ionisation me conduit à parler de quelques recherches que M. Maurice Curie et moi-même avons exécutées sur la cohésion diélectrique des gaz rares.

M. Darmois nous a donné la définition de cette grandeur. Je préciserai qu'elle s'applique à la courbe de Paschen, construite en éliminant l'influence des électrodes. Bouty employait, à cet effet, un condensateur entre les plateaux duquel il plaçait un récipient plat, en verre, qui communiquait avec un appareil susceptible de faire varier la pression du gaz qui s'y trouvait enfermé. Les plateaux du condensateur étaient réunis aux bornes d'une batterie d'accumulateurs à haute tension, et il notait pour quelle différence de potentiel une effluve lumineuse se produisait à l'intérieur de l'ampoule de gaz, lorsque la pression variait.

Nous avons repris le même dispositif, mais au lieu d'employer un champ constant, que nous n'avions pas à notre disposition, nous avons opéré en champ alternatif. Nous avons retrouvé pour l'hélium et le néon sensiblement les mêmes valeurs que Bouty, soit respectivement 19,8 et 6,3.

Pour l'argon, nous retenons la valeur 28, mais nos résultats ont été très variables. La cohésion diélectrique du krypton est 41,4 et celle du xénon, 131,2.

Un point curieux c'est que la cohésion diélectrique des gaz, c'est-à-dire la résistance qu'ils opposent à l'amorçage du courant est d'autant plus grande que le potentiel d'ionisation est plus faible. A première vue cette relation paraît tout à fait anormale, car il semblerait que plus un gaz est facilement ionisé plus faible doit être la résistance opposée à l'établissement du courant. Le néon manifeste très nettement un minimum de cohésion, et c'est à cette propriété qu'est due sa luminescence facile et intense.

Lorsqu'on envisage la série néon, argon, krypton et xénon, on voit que la cohésion diélectrique varie en sens inverse du potentiel d'ionisation. Ce fait nous semble lié aux états d'excitation plus ou moins stables des atomes. Si un atome de krypton, par exemple, est susceptible d'être élevé à un état d'excitation plus ou moins stable par choc avec un électron lent, l'énergie des électrons sera absorbée par ces atomes avant qu'elle ait pu atteindre une valeur telle que l'ionisation de l'atome rencontré se produise. D'où la nécessité d'employer de très grands champs électriques pour que le nombre d'ions produits suffise à amorcer la décharge.

Cette hypothèse simple ne rend pas compte de tous les faits, mais nous pensons que c'est dans cet ordre de considérations qu'il faut chercher l'explication de ces phénomènes très complexes.

M. LEBLANC. — Pour purifier l'argon industriellement, nous le faisons passer sur du calcium chauffé au rouge. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut chauffer très fortement et le tube qui renferme le calcium, qu'il soit en pyrex ou en quartz est très rapidement détruit.

Nous avons essayé une méthode indiquée par M. Darmois et qui consiste à faire passer l'argon dans un récipient dans lequel on fait jaillir un arc en courant continu entre une anode en tungstène et une cathode d'alliage sodium-potassium. L'arc est stable et s'amorce facilement, mais la méthode est très dangereuse parce que le récipient dans lequel jaillit l'arc se brise fréquemment et l'alliage sodium-potassium s'enflamme spontanément à l'air.

Nous avons l'intention, soit d'essayer la purification par le magnésium, soit de chauffer le calcium à l'intérieur du tube par induction.

M. LEPAPE. — Industriellement vous pourriez chauffer le calcium dans des tubes métalliques. Je l'ai réalisé en appareil de laboratoire, mais non sans difficulté.

M. LEBLANC. — Les joints devant être rodés sont difficiles à faire.

M. LEPAPE. — On fait actuellement des rodages métalliques très commodes. D'ailleurs, il n'est pas nécessaire d'avoir de très hautes températures ; avec du calcium bien purifié le rouge sombre suffit.

M. LEBLANC. — Nous avons constaté que ce n'était pas suffisant.

M. LEPAPE. — Cela dépend beaucoup du calcium que l'on emploie. A la fin de la guerre, je n'en avais trouvé qu'en Allemagne, depuis j'ai essayé de m'en procurer en France, mais je n'en ai trouvé que de défectueux. J'ai dû en redemander en Allemagne.

M. LAPORTE. — Je voudrais présenter un élément d'explication aux résultats que vient d'indiquer M. Lepape, concernant l'absorption des électrons par les gaz rares. Le mot absorption doit être précisé. Lorsque des électrons, initialement animés d'une même vitesse, se déplacent dans un gaz, leurs chocs contre les atomes du gaz peuvent les arrêter complètement ou seulement les ralentir ou les dévier. On peut définir différentes absorptions correspondant à ces différents effets, ou, en particulier, considérer globalement comme « absorbés » tous les électrons dont la vitesse est modifiée en grandeur, direction, ou sens à la suite de ces chocs.

Il est possible, expérimentalement, de déterminer le nombre des électrons « absorbés » suivant le sens global qui vient d'être donné à ce mot.

Voici le principe de l'une de ces déterminations : dans un récipient, d'abord vide de gaz, des électrons sont accélérés entre un filament incandescent et une plaque percée d'une fente, par un champ électrique. Ces électrons acquièrent une vitesse  $v$  donnée par l'équation :

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V$$

( $m$  masse de l'électron,  $e$  sa charge,  $V$  la différence de potentiel entre le filament et la plaque).

Ces électrons, après traversée de la fente, sont incurvés suivant une trajectoire circulaire par un champ magnétique uniforme, perpendiculaire à leur vitesse ; on peut les recueillir sur une électrode isolée, et mesurer l'intensité  $I_0$  du courant reçu par l'électrode, intensité qui mesure le nombre des électrons traversant la fente pendant chaque seconde.

Si on modifie la différence de potentiel  $V$ , on peut aussi changer le champ magnétique de façon que, quelle que soit la vitesse initiale des électrons, ils décrivent toujours la même trajectoire circulaire ; cette trajectoire coïncide avec l'axe d'un canal métallique étroit.

L'expérience consiste à introduire ensuite un gaz sous faible pression et à mesurer à nouveau l'intensité du courant reçu par l'électrode. On trouve que cette intensité dépend de la longueur de trajectoire (il suffit de déplacer l'électrode) et de la vitesse initiale des électrons (on fait varier  $V$ ). En fonction de la longueur  $x$ , de trajectoire, l'intensité varie suivant la formule :  $I = I_0 e^{-\alpha x}$ .

$\alpha$  est une constante appelée coefficient d'absorption. La diminution du courant provient de ce que les électrons, ralentis ou déviés, viennent se coller sur les parois du canal et n'atteignent plus l'électrode.

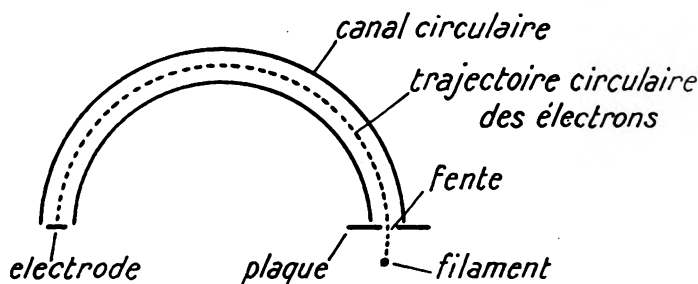


FIG. 1.

On a étudié comment  $\alpha$  variait avec la vitesse des électrons. Les résultats très remarquables sont traduits par des courbes telles que celles des figures 2 et 3, dans lesquelles on porte en abscisses la racine carrée de la différence de potentiel d'accélération (quantité proportionnelle à la vitesse des électrons) et en ordonnée le coefficient d'absorption.

Du point de vue qui nous intéresse, je ferai remarquer que ces courbes présentent pour l'argon, le krypton et le xénon un maximum, très marqué, pour une tension d'accélération qui correspond justement au premier potentiel d'excitation ; c'est-à-dire pour une tension inférieure au potentiel d'ionisation.

Il en est tout autrement pour le néon où le maximum d'absorption, d'ailleurs très atténué, se trouve au delà du potentiel d'ionisation.

Il résulte évidemment de ces faits, que si des électrons sont soumis à l'action d'un champ électrique, ils pourront, dans le néon, atteindre

facilement une énergie suffisante pour amorcer l'ionisation par choc, tandis que, dans les autres gaz, ils seront arrêtés ou ralentis avant d'avoir acquis l'énergie d'ionisation.

Comme la cohésion diélectrique dépend de la facilité plus ou moins grande avec laquelle s'amorce l'ionisation par choc, on doit donc s'attendre à ce que sa grandeur soit liée, non pas aux valeurs des potentiels d'ionisation, comme on pourrait le penser tout d'abord, mais à la probabilité qui existe pour qu'un électron puisse acquérir l'énergie d'ionisation. Cette probabilité dépend évidemment de la position

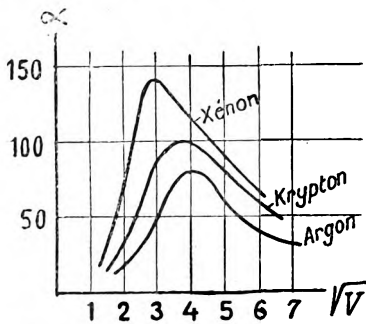


FIG. 2.

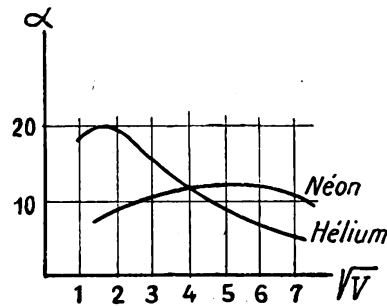


FIG. 3.

de la tension qui correspond au maximum d'absorption par rapport au potentiel d'ionisation et aussi de la grandeur du coefficient maximum d'absorption.

Dans le tableau suivant on a indiqué les tensions  $V_m$  correspondant au maximum d'absorption, les potentiels d'excitation  $V_r$ , les potentiels d'ionisation  $V_i$  et les différences  $V_i - V_m$ . Les gaz ont été rangés dans l'ordre de la différence  $V_i - V_m$  croissante.

| GAZ | $V_m$ VOLTS | $V_r$ VOLTS        | $V_i$ VOLTS | $V_i - V_m$ VOLTS |
|-----|-------------|--------------------|-------------|-------------------|
| Ne  | 25          | 16,6 — 18,5        | 21,5        | — 3,5             |
| A   | 13,2        | 11,5 — 13,0 — 13,9 | 15,4        | 2,2               |
| Kr  | 11,3        | 9,9 — 10,5 — 11,5  | 13,0        | 2,7               |
| Xe  | 6,4         | 8,3 — 8,9 — 11,1   | 11,5        | 5,1               |
| He  | 3,2         | 19,75 — 20,5       | 24,6        | 21,4              |

On voit que pour les quatre premiers gaz, cet ordre coïncide avec celui indiqué par M. Lepape pour la cohésion diélectrique.

L'hélium fait exception, mais cela n'est pas particulièrement étonnant. Au point de vue de la courbe d'absorption, l'hélium se com-

porte comme un gaz polyatomique ; il présente, notamment, contrairement aux autres gaz rares, une absorption notable même pour des électrons très lents. Au point de vue spécial, il se comporte aussi, dans une certaine mesure, comme les gaz polyatomiques, en ce qu'il peut notamment donner un spectre de bandes.

D'ailleurs on peut remarquer que si le maximum d'absorption de l'hélium se place bien au-dessous du potentiel d'ionisation, la valeur de ce maximum est nettement plus petite que pour l'argon, le krypton et, surtout, pour le xénon.

En résumé, je crois que l'on peut relier les résultats de M. Lepape relatifs à la cohésion diélectrique des gaz rares, aux résultats que je viens de rappeler sur les coefficients d'absorption des électrons, et en particulier, le cas de l'hélium mis à part, à la position des maxima d'absorption par rapport aux potentiels d'ionisation.

M. TRUFFAUT résume son rapport sur « *la croissance des végétaux en lumière artificielle* » (1).

M. HENRY. — Je prie M. Truffaut de vouloir bien nous indiquer quel est l'instrument qui lui a servi à mesurer l'intensité d'énergie du rayonnement ?

M. TRUFFAUT. — Les graphiques que j'ai projetés pour les mesures ont été faits par le savant russe Ivanoff. Nous n'avons pas procédé nous-mêmes à ces mesures.

M. HENRY. — Comment définissez-vous le rendement dont vous parlez au Bulletin ?

M. TRUFFAUT. — Vous trouverez le renseignement que vous demandez à la page 816 du bulletin.

Par exemple, pour la deuxième récolte d'avoine, nous connaissions le nombre de calories fournies, puisque nous connaissions notre dépense en watts qui correspondait à 45 313 000 calories. Ayant pesé la récolte d'avoine, nous avons calculé sa valeur calorique en nous basant sur celle de 4 400 calories par kilogramme de poids sec de récolte pesée.

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, t. IX, n<sup>o</sup> 96, août 1929, p. 810.

De cette façon, nous pouvons établir que le coefficient d'utilisation de la lumière électrique des lampes de tungstène, dans le cas de notre deuxième expérience, a été de 2,25 pour cent. Il reste donc très au-dessous des coefficients solaires les plus bas indiqués par Doyarenke pour l'utilisation par l'avoine de l'énergie solaire, son chiffre minimum étant 2,65.

M. HENRY. — Dans vos expériences, la quantité d'énergie considérée comme énergie d'éclairage est bien celle fournie à la lampe ?

M. TRUFFAUT. — Le rendement énergétique de la lampe était de 2,25.

M. LEBLANC. — Je ne mets pas en doute les destructions observées par M. Truffaut en exposant les plantes à la lumière des lampes à vapeur de mercure, mais je me demande s'il est raisonnable d'attribuer cet effet aux rayons ultra-violetés émis par elles.

La lampe qui a été utilisée dans ces essais est une lampe en verre du modèle normal pour l'éclairage. Ces lampes sont faites avec un verre contenant du plomb (demi-cristal) qui ne laisse même pas passer les radiations les plus courtes du spectre solaire.

C'est un résultat connu depuis longtemps, mais que nous avons eu récemment l'occasion de faire confirmer par l'Institut d'Optique sur la demande de la Société pour le Perfectionnement de l'Eclairage.

Une première série d'essais établit que la radiation de longueur d'onde la plus faible trouvée dans le spectre de la lampe était la radiation 3 026 Å, mais qu'elle s'y présentait avec une intensité extrêmement faible. « Or, le spectre solaire par beau temps, en été, s'étend jusqu'à 2 900 et la région 3 026 est d'une assez grande intensité ».

Mais ce renseignement n'est pas suffisant : en effet, la partie ultraviolette du spectre peut bien ne pas être plus étendue pour l'arc à mercure que pour le soleil, mais elle peut représenter une portion plus importante du rayonnement total.

A cet effet, l'on compare la quantité d'énergie ultraviolette reçue par une surface quand la lampe à vapeur de mercure y produit un éclaircissement de 100 lux et quand le soleil y produit un éclaircissement de 2 000 lux. Un éclaircissement de 100 lux à la lumière artificielle est déjà intense, alors qu'un éclaircissement solaire de 2 000 lux est très modéré.

Or, il fut constaté, à l'Institut d'Optique que, dans ces conditions le rayonnement de la lampe contient 3,5 fois moins d'ultra-violet que le rayonnement solaire.

Dans la disposition adoptée par M. TRUFFAUT, je ne pense pas que la lampe ait pu fournir un éclairage de beaucoup supérieur à 100 lux, or il est bien certain que les plantes auraient supporté sans inconvénient un éclairage solaire de 2 000 lux.

M. TRUFFAUT. — Nous avons constaté des résultats merveilleux au début sur les plantes exposées aux radiations de la lampe Cooper Hewitt pendant 3 jours environ, l'intensité du verdissement des feuilles a été notée, puis des phénomènes de nécrose et de castration du bouton de rose se sont manifestés.

M. DARMOIS. — M. Truffaut a dit tout à l'heure qu'il poussait ses lampes à incandescence parce qu'il faut aller jusqu'à 3 000 Å° pour avoir des rayons vraiment utiles, or, on n'a rien dans ce domaine avec la lampe à mercure.

Celle-ci a une raie très intense vers 3 660 Å° qui passe très bien à travers le verre, mais au dessous on n'a rien. Il est très possible qu'il manque le rayonnement dont vous aviez constaté l'insuffisance avec la lampe à incandescence, peut-être la lampe à mercure manque-t-elle de certaines radiations.

M. TRUFFAUT. — Nous avons pensé à utiliser ultérieurement une lampe Cooper Hewitt conjuguée avec une lampe à incandescence.

M. DARMOIS. — Je crois que pour avoir des renseignements sur ce point, M. Truffaut devrait prendre une lampe à vapeur de mercure en quartz et placer devant elle une feuille de verre très mince ; on trouve des feuilles de verre de 1/20 de mm avec lesquelles on fait des couvre-objets pour le microscope, je crois qu'il aurait ainsi le bon rayonnement ultra-violet qui lui est nécessaire.

M. DOURGNON résume son rapport avec M. WAGUET sur « *l'optique des surfaces diffusantes* » (1).

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> série, t. IX, n° 97, septembre 1929, page 939.



M. WAGUET résume son rapport sur « *l'Etat actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles* ».

M. ROUX. — J'ai déjà signalé l'an dernier combien il est fâcheux que le code ne spécifie pas la répartition lumineuse sur la route et demande seulement un éclairage de 2 lux à 20 m.

Les 1 200 bd nécessaires peuvent être données par un grand disque en verre dépoli. Si on avait un disque de 20 cm avec une brillance de 1,5 bd/cm<sup>2</sup> il est certain qu'on aurait un fort éblouissement. Il est à souhaiter que le code empêche de réaliser un appareil semblable. C'est un danger bien plus terrible qu'un phare sur lequel il y aurait un point brillant.

M. WAGUET. — Les points brillants sont très gênants à grande distance. Lorsqu'il y a une tache d'un ou deux centimètres carrés, à grande distance le projecteur peut paraître entièrement éblouissant.

M. ROUX. — Mais un disque de 20 ou 25 cm serait certainement aussi éblouissant.

M. DOURGNON. — Dans notre rapport de l'année dernière nous avons signalé le fait.

M. ROUX. — J'ai posé la question au congrès de la Route à Besançon ; il n'y a été donné aucune suite.

M. DOURGNON. — Nous demandons que le faisceau ne puisse pas atteindre l'œil d'un observateur placé au-dessus de 1,40 m, et que, de plus, il n'y ait aucun point brillant sur la surface, dû à une imperfection de l'appareil, à sa forme ou à celle des filaments, la brillance devant être au plus égale à 1,5 bd/cm<sup>2</sup>.

M. ROUX. — En restant dans les limites de ce que vous demandez, on peut faire quelque chose d'extrêmement dangereux.

M. WAGUET. — Il y a des projecteurs qui n'éclairent pas à 15 mètres.

M. ROUX. — Il faudrait peut-être spécifier la répartition de l'éclairage entre 20 et 50 m. On spécifie seulement l'éclairage à 25 m, mais on ne demande pas d'éclairer plus loin.

M. DARMOIS. — Je me félicite que les questions d'éclairage en France commencent à intéresser un nombre de plus en plus grand de personnes.

M. WAGUET. — Les statistiques montrent l'effort fourni par les constructeurs, mais cet effort leur a été imposé, et à l'heure actuelle ils s'empressent de faire agréer leurs dispositifs.

Depuis trois ans les automobilistes pouvaient circuler avec des projecteurs non conformes, donc ceux qui ont fait l'effort pouvaient s'en dispenser. du moins jusqu'à maintenant.

---

Séance du Mercredi 23 Octobre 1929.

---

**3<sup>e</sup> SECTION. — ÉLECTROCHIMIE. — ÉLECTROMÉTALLURGIE.  
PILES. — ACCUMULATEURS.**

---

SOMMAIRE

- 1<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. ROLLET sur l'accumulateur au plomb. — M. VUIGNER : fixation de sulfate de plomb sur la plaque positive pendant la décharge ; rappel des travaux de M. CHENEVEAU ; fixation d'un persulfate de plomb à la positive. — M. BUNET : communication d'une lettre de M. Féry. — M. BLONDIN : résumé d'une note de M. Jumau ; examen des méthodes employées par M. Rollet, discussion des conclusions de M. Rollet, conclusions relatives à l'accumulateur au plomb, théorie de la double sulfatation et théorie de Ch. Féry, travaux récents de L. Mazza et de E. Denina et A. Frates confirmant la théorie de la double sulfatation, p. 279.
- 2<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. Maurice LEBLANC sur le redresseur « Rectox » à oxyde de cuivre. — M. Maurice LEBLANC : résumé de son rapport. — M. Darmon : Effet Becquerel, p. 290.
- 3<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. André sur les redresseurs à anode colloïdale. — M. André : résumé de son rapport, p. 291.
- 4<sup>o</sup> Présentation par M. BRILLIÉ de films sur la soudure électrique à l'arc et sur la soudure à l'hydrogène atomique, p. 292.

Président : M. Ch. MARIE

*Directeur du Laboratoire d'Electro-Chimie de l'Ecole Pratique  
des Hautes-Etudes*

M. BUNET, Président de la Société, remplace momentanément M. Ch. MARIE.

Il présente les excuses de MM. FÉRY et ROLLET et de MM. JUMAU et PECHKRANZ.

La première question à l'ordre du jour est celle de l'*accumulateur au plomb* (1).

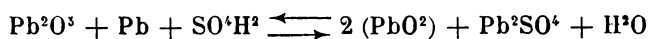
---

(1) Rapport de M. ROLLET sur « La théorie de l'Accumulateur au plomb », et Observations de M. FÉRY, *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, t. IX, n<sup>o</sup> 96, août 1929, p. 832.

M. VUIGNER. — Les travaux de M. Féry ont, depuis longtemps, mis en lumière le rôle que jouent, dans le fonctionnement de l'accumulateur au plomb, le peroxyde de plomb  $Pb^2O^3$ , d'une part, et le sulfate plombeux  $Pb^2SO^4$ , d'autre part.

L'étude que M. Féry a publiée dans le Bulletin de la Société des Electriciens de février 1919 est un véritable modèle d'observation et de démonstration et la belle thèse de M. Rollet confirme très élégamment ses conclusions.

Il est donc bien prouvé que la formule de M. Féry :



est la formule fondamentale du fonctionnement de l'accumulateur au plomb.

Pourtant, un point reste à préciser.

Pendant la décharge, la positive fixe du sulfate de plomb.

C'est un fait qu'il faut bien concéder aux partisans de la double sulfatation et que n'explique pas la formule de M. Féry.

Evidemment, il intervient au cours de la décharge un phénomène accessoire dont il reste à préciser la nature.

A ce sujet, il me paraît nécessaire de rappeler la très intéressante conférence qu'a faite M. Chéneveau le 21 novembre 1925 à la troisième section de la Société Française des Electriciens.

Il a remarqué que :

1° d'après la théorie de la double sulfatation, il se produirait pendant la décharge :

pour la *négative*, une augmentation de poids de 46,4 pour cent ;

pour la *positive*, une augmentation de poids de 26,9 pour cent ;

2° d'après la théorie de M. Féry, il se produirait au cours de la décharge :

pour la *négative*, un gain de 23,2 pour cent ;

pour la *positive*, une perte de 3,2 pour cent.

Pour vérifier expérimentalement quelles sont les variations de poids qui se produisent réellement pour la négative et pour la positive, M. Chéneveau a monté deux éléments d'essai :

— l'un, formé d'une *positive* portée par le fléau d'une balance hydros-tatique et de deux *négatives* fixes ;

— l'autre, de disposition inverse.

Pour éliminer les variations de poussée du liquide électrolytique dont la densité varie avec le débit, le volume du liquide a été pris assez grand pour que ces variations soient négligeables (2 litres).

Les plaques de  $104 \times 104 \times 2$  mm, préparées par un spécialiste, portaient chacune 100 g de matière active.

Le tableau ci-dessous, correspondant à une décharge de 8 Ah à 1 A, met en regard les résultats expérimentaux et les résultats hypothétiques correspondant aux deux théories en présence.

*Variations de poids pour cent*

| <i>Expériences</i> | <i>Double sulfatation</i> | <i>Féry</i> |
|--------------------|---------------------------|-------------|
| Négative gain 10,2 | gain 46,4                 | gain 23,2   |
| Positive gain 5,2  | gain 26,9                 | perte 2,2   |

On voit combien les résultats sont en désaccord avec ceux que suppose la théorie de la « double sulfatation » dont la condamnation se trouve ainsi confirmée.

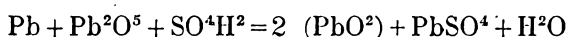
Mais, s'ils sont plus voisins de ceux que suppose la nouvelle théorie de M. Féry, ils s'en écartent assez cependant pour faire penser qu'une *réaction secondaire* doit intervenir et pour conduire à proposer l'explication suivante :

On a supposé jusqu'ici, dans l'une et l'autre théorie, que l'électrolyte est une solution d'acide sulfurique ne pouvant céder *que de l'hydrogène* à la positive.

C'est en réalité comme M. Bary l'a indiqué en 1904, une *solution saturée de sulfate de plomb* dans l'eau acidulée et la présence de ce sulfate de plomb en solution est *nécessaire* au fonctionnement.

Tout porte à croire que le sulfate de plomb dissous s'électrolyse pendant la décharge et que l'ion *plomb*, se portant sur le peroxyde  $Pb^2O^5$ , provoque la réduction de ce corps.

La *litharge* ainsi formée se sulfate de suite et finalement la réaction suivante se produit à la positive :



Tandis que la réduction par *l'hydrogène* conduit à une *perte* de poids par perte d'oxygène, la réduction par le *plomb* conduit à une *augmentation* de poids de la positive par fixation de *sulfate de plomb*.

Ce gain de la *positive* est d'ailleurs produit aux dépens de la *négative* à laquelle est emprunté le plomb amené par l'électrolyse, la *négative* jouant le rôle d'anode.

L'accroissement de poids de la négative n'est plus donné par le poids de  $\text{SO}^4$  fixé, mais par la différence entre le poids de  $\text{SO}^4$  fixé et le poids de Pb perdu.

En somme, la *positive* gagne du poids au lieu d'en perdre et la *négative* ne gagne pas autant de poids que ce qu'indiquerait la théorie.

Les différences sont grandes et, par conséquent, le phénomène auquel elles sont dues joue, dans le fonctionnement de l'accumulateur un rôle qui, pour être accessoire, n'en est pas moins d'une réelle importance.

Mais l'hypothèse d'un transport de plomb par électrolyse soulève bien des objections.

Il n'est pas vraisemblable que le plomb, métal lourd, présente une mobilité comparable à celle de l'oxygène et de l'hydrogène.

La première chose à faire est, en tous cas, de vérifier expérimentalement si, au cours de la décharge, la positive gagne du plomb et la négative en perd.

Si, comme je le pense, le transport du plomb est nul ou insignifiant, quelle explication peut-on donner aux constatations que M. Chéneveau a faites et qu'il est nécessaire de retenir ?

Remarquons, d'abord, que le sulfate qui se produit sur la positive pendant la décharge, ne doit pas être du sulfate normal  $\text{PbSO}_4$ , car ce sulfate, très stable, ne se décomposerait pas pendant la charge ainsi que cela a lieu.

On peut supposer que l'oxygène libéré par la positive pendant la décharge ne se transporte pas tout entier sur la négative.

Une partie serait employée sur place pour produire de l'*acide persulfurique*, composé connu, dont la production est très vraisemblable lorsqu'il y a en présence de l'acide sulfurique et des ions oxygène.

Tandis qu'il se forme, à la *négative*, un sulfate *pauvre en oxygène*  $\text{Pb}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}^3$ , il se formerait à la *positive* un sulfate *riche en oxygène*, quelque chose comme  $\text{PbO}^2$ ,  $\text{S}^2\text{O}^7$ .

Le fait que tout l'oxygène ne s'est pas porté à la négative pour y produire du sulfate plombeux, expliquerait que la négative n'ait pas gagné autant de poids que ce qu'indiquerait la théorie de M. Féry.

La fixation du persulfate à la positive expliquerait que la positive ait gagné du poids au lieu d'en perdre.

M. BUNET. — Nous devons regretter d'autant plus l'absence de M. Féry qu'entre les auteurs des théories sur les accumulateurs exis-

tent des différences d'opinion très grandes, qu'il nous est malheureusement difficile de tirer au clair, car il a été jusqu'ici impossible de les mettre tous en présence.

Connaissant l'intervention de M. Vuigner, M. FÉRY nous a écrit la lettre suivante :

« Je dois remercier tout d'abord M. Vuigner de l'opinion si élogieuse qu'il émet sur mes travaux anciens de 1919 ; je le féliciterai à mon tour pour l'exposé si clair de l'état actuel de la théorie de l'accumulateur au plomb.

M. Rollet m'a avoué, depuis qu'il a passé sa remarquable thèse, qu'il pensait bien confirmer la théorie de la double sulfatation, lorsqu'il avait commencé ses recherches ; on ne pourra donc pas l'accuser de parti pris pour ma théorie dans ses conclusions.

Son travail complète heureusement le mien, car si l'analyse chimique de *plaques à formation Planté*, lui a permis de reconnaître et de doser le sulfate plomboux, elle lui interdisait, avec ces plaques, de déterminer la composition du superoxyde  $Pb^2O^5$ , ce que j'avais fait en prélevant la matière de *plaques à oxyde rapporté*.

Je suis tout à fait d'accord avec M. Vuigner au sujet de la fixation de sulfate de plomb sur la positive déchargée. Je pense, avec M. Rollet, que la présence de ce sel est due à un phénomène étranger à la production du courant, puisque j'ai observé que des cristaux de ce sel apparaissent sur les plaques positives d'un accumulateur chargé *abandonné au repos*, et que pendant la décharge, où ces cristaux augmentent en volume, la positive ne reçoit que des ions H ou Pb.

Toutefois, la suggestion d'un transport de plomb sur la positive pendant la décharge, grâce aux ions du sulfate en solution, n'est pas inadmissible. C'est cette hypothèse que nous avons envisagée avec mon ami Chéneveau pour expliquer les résultats inattendus des mesures qu'il a faites en pesant les plaques d'un élément en décharge.

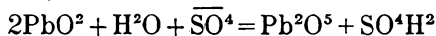
Je me permettrai de faire une troisième hypothèse : la formation de sulfate plomboux pendant la décharge à la négative étant bien démontrée, ne peut-on penser que le liquide entourant cette plaque soit une solution de sulfate plomboux dans l'acide sulfurique ?

Dans ce cas, et si la solubilité de ce sel est plus grande que celle du sulfate plombique, il serait naturel que ce dernier prît naissance en venant s'oxyder au contact de la positive.

A ce moment, cette solution sursaturée devrait cristalliser.

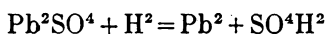
En réponse à une question de M. Vuigner, je pense que le sulfate formé sur la positive pendant la décharge disparaît principalement par dissolution dans l'acide concentré qui prend naissance dans cette plaque à la charge suivante :

Si on examine un élément en charge, monté dans une cuve optique à faces parallèles, on peut observer (avant le dégagement gazeux final), des coulées lourdes d'acide qui tombent au fond de la cuve. Les ions  $\text{SO}^4$  se rendent en effet sur la positive en donnant la réaction :



C'est l'acide ainsi formé qui peut dissoudre les cristaux fixés sur la positive ainsi que je l'ai constaté récemment.

Quant à la négative, elle repasse à l'état métallique par réduction du sulfate plombéux :



J'avoue que je ne crois pas à la formation d'acide persulfurique à la positive *pendant la décharge* ; ce composé, très instable, aurait pu prendre naissance plutôt à la charge, mais disparaîtrait rapidement.

En résumé, si la réaction principale de l'accumulateur paraît bien établie, nous ne pouvons que faire des hypothèses pour expliquer la présence de  $\text{SO}^4\text{Pb}$  sur la positive déchargée. »

Comme vous le voyez, M. Féry n'est pas tout à fait d'accord avec M. Vuigner.

D'autre part, M. JUMAU, adversaire principal de la théorie de M. Féry, et qui reste un partisan convaincu de la double sulfatation, nous a envoyé une note que M. Blondin veut bien présenter et qui est résumée ci-après <sup>(1)</sup> :

#### I. EXAMEN DES MÉTHODES EMPLOYÉES PAR M. ROLLET

M. Jumaу discute les deux méthodes employées par M. Rollet : celle de la densité critique en courant alternatif, et celle de la décharge d'une couche activée formée en courant continu sur l'électrode.

La densité de courant critique est celle à partir de laquelle apparaît le dégagement gazeux en courant alternatif. M. Rollet déduit du

---

(1) Le texte in-extenso de la note de M. JUMAU a paru dans la *Revue générale de l'Electricité* du 7 décembre 1929.



rapport des densités de courant critique le rapport des quantités d'oxygène fixées par l'électrode métallique et, par suite, la composition relative de ces oxydes, c'est-à-dire leur composition absolue quand l'un d'eux est connu.

M. Jumau critique cette méthode qui suppose que dans tous les cas la même masse de métal actif entre en jeu et qui néglige les quantités d'oxygène et d'hydrogène qui peuvent être absorbées ou dissoutes.

Dans l'autre méthode, utilisant le courant continu, M. Rollet forme sur les différents métaux essayés (argent, cuivre, nickel, plomb) une couche mince d'oxydes ; il étudie la décharge de cette couche active prise comme anode en présence d'une cathode constituée par de l'amalgame de potassium, l'électrolyte étant une solution de potasse ou de carbonate de potassium. S'il y a réduction successive de plusieurs oxydes, la courbe de décharge (tension et courant) présente des paliers différents. M. Rollet déduit les degrés relatifs d'oxydation des quantités relatives d'électricité dégagées pendant les diverses phases correspondant aux paliers. M. Jumau reproche à cette méthode les défauts suivants : la transformation d'un oxyde en un oxyde inférieur n'est pas forcément intégrale, ou si l'on préfère le coefficient d'utilisation des matières actives anodiques est très souvent inférieur à l'unité. D'autre part, en présence de masses très faibles de matière active, les différences de solubilité peuvent provoquer des erreurs non négligeables. Enfin, la matière active travaillant sous une faible épaisseur, les oxydes suroxygénés instables du métal de l'anode (ou aussi les composés suroxygénés instables de l'électrolyte) tels qu'ils sont produits à la fin de la charge peuvent prendre une importance autrement grande que lorsque la matière active est en couche épaisse. Ce sont ces corps instables qui agissent pendant la période du « coup de fouet » des accumulateurs, correspondant à une capacité négligeable par rapport à celle des réactions principales. M. Jumau signale encore que dans cette méthode les degrés d'oxydation constatés sont relatifs à l'anode fonctionnant dans un électrolyte déterminé (en général, la potasse) et qu'ils ne sauraient être les mêmes avec un autre électrolyte.

## II. DISCUSSION DES CONCLUSIONS DE M. ROLLET

M. Jumau examine les conclusions de M. Rollet concernant les différents oxydes métalliques utilisés comme matière active anodique dans les accumulateurs électriques.

### 1. *Anode d'argent*

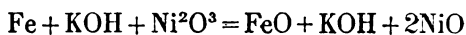
En ce qui concerne l'argent, il ne conteste pas que le peroxyde d'argent formé en solution de potasse puisse être  $\text{Ag}^4\text{O}^3$  au lieu de  $\text{Ag}^2\text{O}^2$  comme on l'admettait jusqu'ici ; mais comme les données thermochimiques ne confirment pas cette hypothèse, et étant données les causes d'erreurs de la méthode, il pense que de nouveaux essais seraient nécessaires, notamment des analyses des matières actives aux différents états.

### 2. *Anode de cuivre*

L'étude de l'anode de cuivre amène M. Rollet à conclure à la formation d'un peroxyde (peut-être  $\text{Cu}^2\text{O}^3$ ), l'électrolyte étant une solution de potasse ; mais on ne peut rien affirmer en raison de la solubilité relativement assez grande de  $\text{CuO}$  formé pendant la décharge du peroxyde.

### 3. *Anode de nickel*

L'étude de l'anode de nickel est spécialement intéressante pour les accumulateurs couramment employés fer-potasse-sesquioxyde de nickel. En chargeant une anode de nickel dans une solution de potasse et en la déchargeant dans une solution de carbonate de potassium, M. Rollet a obtenu des paliers successifs de décharge correspondant aux oxydes  $\text{NiO}^2$ ,  $\text{Ni}^2\text{O}^3$ ,  $\text{NiO}$ . En réalité, la matière positive chargée prépondérante est  $\text{Ni}^2\text{O}^3$  et le stade de décharge est défini par la formule :



### 4. *Anode de plomb*

M. Rollet oxyde une lame de plomb dans une solution de carbonate de potassium ou dans une solution d'acide sulfurique, puis étudie sa décharge dans un électrolyte au carbonate de potassium en présence d'une cathode à amalgame de potassium ; il dit avoir trouvé dans tous les cas un même résultat : 3 stades de décharge correspondant à  $\text{Pb}^2\text{O}^5$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{Pb}$ , dont les deux premiers sont seuls intéressants. Pendant le premier palier de la courbe  $\text{Pb}^2\text{O}^5$  se réduirait en  $\text{PbO}^2$  ; celui-ci se réduirait à son tour en  $\text{Pb}$  métallique ; il n'est pas question de l'état d'oxydation  $\text{PbO}$ .

M. Jumaù remarque que  $\text{PbO}$  existe bien en électrolyte sulfurique, et qu'on ne peut pas comparer les réactions en solution de carbonate

de potassium à celles qui se passent en solution acide ; il conteste enfin l'interprétation de deux expériences de M. Rollet.

### III. CONCLUSIONS RELATIVES A L'ACCUMULATEUR AU PLOMB

#### 1. *Electrode positive*

La conclusion de M. Jumaу concernant l'électrode positive de l'accumulateur au plomb est que la thèse analysée ne prouve pas qu'il se forme pendant la charge un superoxyde  $Pb^2O^5$  et encore moins que ce superoxyde est la matière active positive de l'accumulateur au plomb.

Sans doute il peut se produire sur la plaque positive au plomb, dans certaines conditions, de très petites quantités d'un oxyde supérieur à  $PbO^2$ , comme il se produit des traces de produits suroxygénés de l'électrolyte : acide persulfurique, eau oxygénée, ozone. Ce qui est certain, c'est que l'analyse de la matière active chargée donne un peu moins de 100 pour cent de  $PbO^2$ , ce qui veut dire qu'à côté de  $PbO^2$ , il reste toujours de petites quantités de  $SO^4Pb$  et de  $PbO$ .

Les faits expérimentaux signalés dans la thèse de M. Rollet s'expliquent avec la théorie de la double sulfatation à condition d'admettre que la matière active positive a un coefficient d'utilisation de l'ordre de 40 pour cent. M. Jumaу fait remarquer que ce coefficient varie dans de grandes limites avec les conditions des essais (épaisseur et porosité de la matière active, densité de courant de décharge, concentration de l'acide, température, etc.) et qu'il a trouvé des variations entre 0,1 et 0,6.

#### 2. *Electrode négative*

M. Jumaу conteste la formation de  $Pb^2O$  ou de sulfate plombéux  $Pb^2SO^4$  pendant la décharge de l'électrode négative de l'accumulateur au plomb. Il a déjà signalé plusieurs fois que l'analyse de la matière active ne peut pas permettre de savoir si la matière active déchargée est un mélange de  $Pb$  et de  $PbSO^4$  ou le composé  $Pb^2SO^4$ . Etant donné qu'on trouve en pratique des coefficients d'utilisation de la matière active dépassant parfois 0,5, en admettant la formation de  $PbSO^4$ , cela voudrait dire que l'hypothèse de la formation de  $Pb^2SO^4$  conduirait à des coefficients supérieurs à l'unité, ce qui serait absurde.

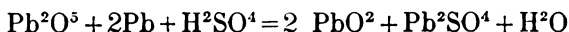
#### 3. *Conclusion*

M. Jumaу estime que les expériences de M. Rollet n'apportent nullement la preuve qu'il se forme un superoxyde  $Pb^2O^5$  à l'électrode

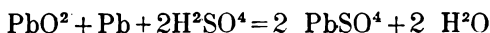
positive et encore moins que ce superoxyde est la matière active de l'électrode positive. Elles ne prouvent pas non plus que la matière négative, le plomb spongieux, passe à l'état  $Pb^2O$  pendant la décharge.

#### IV. LA THÉORIE DE LA DOUBLE SULFATATION ET LA THÉORIE DE CH. FÉRY

Dans une note parue au Bulletin de la Société française des Electriciens d'août 1929 (p. 839-842), M. Ch. Féry dit qu'il trouve dans la thèse de M. Rollet confirmation de sa théorie. Sans revenir sur tous les arguments qu'il a présentés autrefois, M. Jumaù estime que la discussion de la thèse de M. Rollet n'apporte aucunement la preuve des deux principaux points de la théorie de M. Ch. Féry, à savoir que la matière active positive est le superoxyde  $Pb^2O^5$  se réduisant en  $PbO^2$  à la décharge et que le plomb spongieux de la négative passe en décharge à l'état de sulfate plombé  $Pb^2SO^4$ , selon la réaction réversible



opposée à celle qui est admise dans la théorie de la double sulfatation



Dans la nouvelle note de M. Féry, M. Jumaù ne voit qu'un fait nouveau à retenir, concernant une hypothèse sur la formation de sulfate pendant la décharge de la plaque positive et entreprend de la réfuter.

Enfin, M. Jumaù résume les conclusions de deux travaux importants faits en Italie, qui apportent de nouveaux arguments en faveur de la théorie de la double sulfatation.

#### V. TRAVAUX RÉCENTS CONFIRMANT LA THÉORIE DE LA DOUBLE SULFATATION

##### 1. *Expériences de L. Mazza*

L. Mazza a recherché les substances qui se forment en charge et en décharge sur les électrodes de l'accumulateur au plomb, par la méthode des poudres cristallines de Hull, Debye et Scherrer. On sait que cette méthode consiste à irradier la substance à analyser préalablement réduite en poudre fine, par un faisceau monochromatique de rayons X ; cette irradiation donne sur un film un spectre dont chaque raie a une position qui dépend de la constante réticulaire de l'une des faces cristallines de la substance.

L. Mazza a d'abord pris des photogrammes du peroxyde de plomb, du plomb, du sulfate de plomb ainsi que du mélange de ces corps dans lequel il pouvait déceler la présence de 5 pour cent d'un des composants en employant des radiations de longueur d'onde relativement grande : anticathodes de fer et de cuivre excitées par des tensions de 65 et 60 kV avec de longues expositions (0,015 A pendant 5 heures).

Il a trouvé que la matière active positive chargée d'un accumulateur présente les mêmes lignes d'interférence, en position et en intensité, que le peroxyde de plomb  $\text{PbO}^2$ , et n'en présente pas d'autre. On doit donc admettre que la matière active positive chargée est bien le peroxyde  $\text{PbO}^2$ , et que s'il existe un autre oxyde de plomb, celui-ci ne peut être qu'en très petite proportion. Entre le peroxyde chimique et le peroxyde noir d'une plaque surchargée il n'y aurait de différence que dans la largeur même des lignes d'interférence, ce qui prouverait que la différence de couleur provient seulement de la grandeur des particules cristallines.

La matière active positive déchargée donne un photogramme dans lequel on reconnaît exactement la position des raies du peroxyde de plomb et de celles du sulfate de plomb.

La matière négative chargée de l'accumulateur au plomb donne des lignes d'interférence identiques en position et en intensité à celles du plomb métallique. L. Mazza en conclut que le plomb spongieux de la plaque négative a une structure cristalline qui ne diffère de celle du plomb ordinaire ni par la forme ni par les dimensions.

Enfin la comparaison des photogrammes de la matière active négative déchargée, d'une part, du plomb et du sulfate de plomb d'autre part, montre que cette matière déchargée est un mélange uniquement de plomb et de sulfate de plomb.

Les expériences de L. Mazza apportent donc un appui nouveau à la théorie de la double sulfatation.

## 2. Expériences de E. Denina et A. Frates

Pour démontrer que le peroxyde de plomb  $\text{PbO}^2$  obtenu chimiquement donne bien la même force électromotrice que la matière active positive de l'accumulateur au plomb (comme l'avait démontré Ch. Liagre à la séance commune du 27 janvier 1927 de la Société française des Electriciens et de la Société de Chimie industrielle), ces auteurs ont mesuré le potentiel dans l'acide sulfurique de divers oxydes de

plomb et des mélanges de  $\text{PbO}^2$  avec  $\text{PbSO}^4$  et de  $\text{PbSO}^4$  avec  $\text{Pb}$  ; ils employaient l'électrode normale à sulfate mercurieux comme électrode auxiliaire, et ils évitaient toute influence de résistance intérieure des électrodes examinées grâce à un dispositif potentiométrique.

Ils ont ainsi démontré que les couples correspondant aux mélanges  $\text{PbO}^2\text{-PbSO}^4$  et  $\text{PbSO}^4\text{-Pb}$  sont stables, et que le potentiel de ces deux mélanges correspond exactement à celui des électrodes positive et négative de l'accumulateur au plomb.

## VI. CONCLUSIONS

Sans prétendre que la théorie de la double sulfatation soit une théorie définitive, M. Jumau conclut qu'elle est une bonne théorie permettant d'expliquer les faits expérimentaux connus et que les attaques dont elle a été l'objet pendant ces dernières années ont plutôt contribué à la renforcer.

M. MARIE prend la présidence

M. Maurice LEBLANC présente une communication sur le *redresseur Rectox* <sup>(1)</sup> et termine en souhaitant qu'une théorie physique du phénomène puisse être enfin édifiée.

M. MARIE. — Quelle est l'épaisseur de la couche d'oxyde de cuivre ?

M. LEBLANC. — Elle est de l'ordre de quelques microns.

M. MARIE. — Il est difficile de produire ces rondelles d'une manière régulière.

M. LEBLANC. — Une première difficulté est d'amener la couche d'oxyde à cette épaisseur par des procédés chimiques ou mécaniques. Une autre difficulté est d'obtenir un bon contact électrique sur cette couche à oxyde de cuivre ; dans les rondelles que je vous ai montrées, le contact est pris par une rondelle de plomb ; sur d'autres appareils, on réduit superficiellement cette couche d'oxyde de cuivre ; le cuivre ainsi produit fait partie intégrante de la couche d'oxyde et assure un bon contact avec elle.

---

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, tome IX, n° 98, octobre 1929, p. 1061.

M. DARMOIS. — Personne n'a jamais rapproché ces phénomènes de l'effet Becquerel ? Il y a une centaine d'années, exactement en 1839, Becquerel a découvert un effet très spécial. Quand on constitue une pile avec deux électrodes en cuivre oxydé, trempées à peu près dans n'importe quel électrolyte, il apparaît une force électromotrice très importante si on éclaire une des électrodes. Dans les diverses théories proposées, on fait intervenir les propriétés électrolytiques de la couche d'oxyde de cuivre.

M. LEBLANC. — Je ne crois pas que personne ait songé à faire ce rapprochement.

M. DARMOIS. — S'il y a une force électromotrice au contact de l'oxyde de cuivre et du cuivre, il est possible que le passage du courant n'ait pas lieu de la même façon dans les deux sens.

M. LEBLANC. — C'est ce genre d'explications qui ne me satisfait pas. Ce n'est que reculer pour mieux sauter. Car quelle explication peut-on donner de l'existence de cette force électromotrice ?

M. GIRAULT. — Dans quel sens le courant peut-il passer ?

M. LEBLANC. — Les électrons vont plus facilement du cuivre vers l'oxyde que dans le sens inverse ; par conséquent la résistance ohmique opposée au passage du courant est plus faible de l'oxyde vers le cuivre.

M. ANDRÉ présente une communication sur les *redresseurs à anode colloïdale* <sup>(1)</sup>.

M. LEBLANC. — Il serait intéressant d'axoir une explication de ce qui se passe dans ces redresseurs.

M. MARIE. — Il est très pénible de suivre des expériences comme celle-ci sans un guide théorique.

---

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4<sup>e</sup> série, tome IX, n° 97, septembre 1929, p. 961.

M. ANDRÉ. — Cela demande des centaines d'expériences et des dépenses considérables. Je puis dire qu'il en a coûté à la Radiotechnique près d'un million de francs et aux Etats-Unis encore beaucoup plus.

M. BRILLIÉ présente sa communication accompagnée d'un film sur « *La soudure électrique* ».

M. BRILLIÉ. — Je ne crois pas qu'il y ait dans l'industrie de sujet plus traité, plus lu, plus projeté, que celui de la soudure électrique à l'arc.

Je crois qu'il faut en chercher les raisons dans ce que ce procédé d'assemblage intéresse toutes les branches de l'industrie.

A l'heure actuelle, les croiseurs allemands sont construits par soudure ; les affûts de canons de l'Arsenal de Watertown aux Etats-Unis sont construits par soudure ; les avions sont construits par soudure. La soudure s'introduit dans tous les domaines avec succès.

Le remplacement des bâtis coulés par des bâtis soudés a trouvé ses premières applications dans l'industrie électrique, et je pense qu'à ce titre, vous serez particulièrement intéressés par le film de la GENERAL ELECTRIC COMPANY que je vais avoir l'honneur de vous présenter.

*Première partie du film.* — M. BRILLIÉ profite de l'interruption entre les deux parties du film pour le commenter de la manière suivante :

Vous avez pu remarquer que l'appareillage électrique des machines automatiques à souder est standard. Il est essentiellement constitué par une tête de soudure qui permet le déroulement du fil électrode et le maintien de l'arc à longueur constante, et par son coffret de réglage.

Cette tête de soudure s'adapte à différents montages pour constituer des machines automatiques de soudure.

Dans le cas de soudures longitudinales, un chariot électrique standard à vitesse réglable se déplace sur une voie de roulement.

Dans le cas de soudures circulaires, au contraire, la tête de soudure est fixe et la pièce se déplace par un mouvement de rotation, soit sur un plateau de tour vertical, soit sur des galets horizontaux.

Les montages qui ont été projetés sont d'autant plus intéressants qu'ils ont été pris chez les clients de la General Electric Company, et par conséquent, ils constituent une documentation industrielle de premier ordre.



Les Américains sont d'ailleurs passés maîtres dans la science des montages. En particulier, vous avez pu remarquer dans le film un montage remarquable pour la soudure des fûts à pétrole avec serrage pneumatique, et un montage pour la soudure des armoires de glacières « Frigeco ».

*Deuxième partie du film.* — M. BRILLIÉ commente la deuxième partie du film de la manière suivante :

Le souci des Américains d'économiser la main-d'œuvre, apparaît nettement dans cette deuxième partie du film, en particulier pour la soudure des traverses de chemins de fer constituées par des vieux rails usés. Les deux manœuvres qui mettent en place les plaquettes destinées à réunir les deux éléments de rails profitent de ce que les longues soudures longitudinales sont exécutées à la machine pour effectuer à la main les petites soudures transversales.

Dans ces conditions, on voit sur la photographie 4 arcs de soudure travaillant simultanément sur la même pièce.

La soudure automatique des ponts arrière et la soudure automatique des cardans sur les transmissions est appliquée en France dans l'industrie automobile, et de nombreuses machines fonctionnent actuellement dans les Ateliers Citroën ainsi que dans les Usines Renault.

*Soudure à l'hydrogène atomique.* — M. BRILLIÉ expose rapidement le principe de la soudure à l'hydrogène atomique, dont l'exécution va être projetée dans le film suivant.

La soudure à l'hydrogène atomique n'est ni une soudure électrique ni une soudure au gaz. Elle s'exécute à l'aide d'un chalumeau qui permet la dissociation de l'hydrogène moléculaire que l'on fait passer entre deux électrodes de tungstène entre lesquelles jaillit un arc.

En arrivant au contact d'une tôle, cet hydrogène atomique qui n'est stable qu'à très haute température, se recombine à l'état moléculaire en libérant sa chaleur de formation empruntée à l'arc. L'hydrogène joue uniquement le rôle de transporteur d'énergie. La réaction de recombinaison des atomes en molécules a lieu à une très haute température plus élevée que celle de l'arc, qui dépend d'ailleurs de la nature de la pièce sur laquelle on soude. Cette pièce joue, en effet, le rôle de catalyseur.

C'est ainsi que l'on peut, avec l'hydrogène atomique, fondre du tungstène, comme on le verra dans le film, et qu'il est très difficile

de fondre du quartz qui pourtant fond facilement avec le chalumeau ordinaire. Il y a là un phénomène tout à fait nouveau.

L'avantage de l'hydrogène atomique est de permettre la soudure des métaux dans une atmosphère réductrice, et en particulier de tous les métaux dont la soudure est impossible avec d'autres procédés, par la formation d'oxydes. C'est ainsi que l'on peut souder tous les aciers inoxydables ou les aciers à forte teneur en chrome, qu'il est très difficile de souder par tout autre procédé.

*Projection du film de laboratoire sur l'arc électrique.* — M. BRILLIÉ présente enfin un film de laboratoire sur l'arc électrique de soudure, qui a été mis au point par M. Bull, sous-directeur de l'Institut Marey, après de nombreux échecs rencontrés aussi bien en France qu'aux Etats-Unis pour la prise d'une telle vue.

L'arc électrique, en effet, cinématographié par les procédés ordinaires, donne un halo qui empêche toute étude du phénomène de transport de métal. Grâce au dispositif imaginé par M. Bull, qui consiste à utiliser l'éclat du soleil pour silhouetter l'arc électrique, les électrodes et la tôle apparaissent à la façon d'ombres chinoises, en noir sur fond clair.

Ce film, pris à un très grand ralenti, permet de voir nettement l'avantage que présente l'emploi d'électrodes enrobées qui suppriment les crachements de l'arc, et le rebondissement des gouttes de métal en fusion qui, par un phénomène capillaire très curieux, semblent complètement élastiques.

Ce film a été pris avec un appareil mis spécialement au point par l'Institut Marey, à la vitesse de 200 vues par seconde.

### *Conclusions*

M. BRILLIÉ fait remarquer que le premier film montre une nouvelle machine-outil qui vient de naître et dont le champ d'applications est illimité ; que le film sur l'hydrogène atomique montre qu'une nouvelle méthode de soudure commence à se développer aux Etats-Unis, et il souhaite que les Ingénieurs présents délimitent le champ d'application de ces nouvelles machines dans leurs différentes industries.

Il se tient, d'ailleurs, à leur disposition pour les documenter plus complètement s'ils le désirent.

M. MARIE. — Je suis certain d'être votre interprète en remerciant tout spécialement M. Brillié des films très intéressants qu'il vient de nous présenter, et particulièrement du dernier qui est une primeur, n'ayant pas encore été projeté.

M. MEUNIE — D'où vient le nom d'hydrogène atomique ? Sait-on s'il est à l'état atomique ou simplement chauffé ?

M. BRILLIÉ. — Il serait peut-être utile que je vous fasse l'historique de sa découverte.

C'est en faisant des essais sur les lampes à incandescence, qui ont conduit à la découverte de la lampe demi-watt, que le Docteur Irving Langmuir a découvert l'hydrogène atomique. En mettant des gaz différents dans les ampoules et en mesurant, d'une part l'énergie fournie, d'autre part l'énergie recueillie par rayonnement, conduction et convection de la chaleur, Langmuir a constaté qu'avec l'hydrogène, à partir d'une certaine température, il y avait une discontinuité dans la courbe des chaleurs recueillies en fonction des températures.

Comme il n'y avait que de l'hydrogène pur dans l'ampoule, la seule hypothèse possible est que l'hydrogène est dissocié à l'état atomique.

Pour avoir la confirmation de l'hypothèse — c'était avant la guerre — Langmuir a fabriqué de l'hydrogène atomique et il est arrivé à réduire des oxydes dans des conditions qui n'avaient pas été réalisées avec l'hydrogène ordinaire. L'hydrogène obtenu avait donc des propriétés chimiques nouvelles. Langmuir a fait, ensuite, toute une théorie mathématique montrant que le seul moyen d'expliquer les énormes quantités de chaleur transportées par ce procédé était l'acceptation de cette hypothèse.

Une étude complète sur ce sujet paraîtra prochainement dans la *Revue de Métallurgie*. Elle comporte la traduction des mémoires du Docteur Langmuir, avec les expériences que nous avons eu l'occasion de faire dans les laboratoires de la SAF. Vous aurez dans cet article un résumé du calcul qui permet de confirmer l'hypothèse.

#### 4<sup>e</sup> SECTION. — CANALISATIONS. DISTRIBUTION GÉNÉRALE. TRACTION

##### SOMMAIRE

- 1<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. FALLOU sur la limitation des courts-circuits dans les réseaux haute tension. — M. DARRIEUS: emploi des transformateurs dits non résonants; M. LANGLOIS-BERTHELOT: décrochages ou phénomènes d'instabilité transitoire; moyens préconisés en Amérique pour maintenir la stabilité en régime transitoire. — M. FALLOU: oscillographes à fonctionnement automatique de l'Union d'Electricité; problème de l'excitation à réponse rapide, p. 296.
- 2<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. BUNET sur l'emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution. — M. BOUCHEROT: rappel de ses travaux; combinaisons de condensateurs et de bobines de self-induction pour obtenir des courants constants, alternateur auto-exciteur à fer tournant, alternateurs monophasés combinés avec des condensateurs pour augmenter la fréquence fondamentale, couplage d'alternateurs en tension, amélioration du facteur de puissance, emploi des condensateurs en série. — M. DARRIEUS: application récente aux Etats-Unis d'un montage Boucherot de 1895. — M. FALLOU: interrupteurs de haute tension équipés pour être utilisés comme transformateurs de potentiel. — MM. AILLERET, FALLOU, BOUCHEROT, ROTH: facteurs de surtension pour les fréquences harmoniques, p. 304.
- 3<sup>o</sup> Présentation du rapport de M. BARILLOT sur les postes extérieurs par M. GASTINE. — M. DAGUERRE: emploi d'ossatures en ciment armé, p. 312.
- 4<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. GRATZMULLER sur le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes. — M. GRATZMULLER: Résumé de son rapport, et exposé de la récupération sur la rampe de Capvern (Chemins de fer du Midi). — M. BACHELLERY: freinage par récupération et freinage rhéostatique. — M. LARTIGUE: récupération appliquée aux tramways, p. 313.

Présidence de M. DAGUERRE

Ingenieur en chef au Nord Lumière

M. FALLOU présente son rapport sur « *la limitation des court-circuits dans les réseaux haute-tension* » (1).

M. DARRIEUS — Si les conclusions de M. Fallou paraissent pour l'instant inévitables, et s'il semble que se manifeste en effet aux Etats-

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série, Tome IX, N<sup>o</sup> 96. août 1929, page 883.

Unis à l'égard de cette mise à la terre du neutre, admise sans discussion il y a quelques années, et qui subsiste d'ailleurs sur tous les réseaux à très haute tension, le maintien de cette mise à la terre directe serait quand même désirable, notamment au point de vue d'un perfectionnement très intéressant en principe, et qui paraît devoir se répandre, l'emploi des transformateurs dits non résonants, dans lesquels une répartition convenable de la capacité prévient une répartition anormale de la tension le long du bobinage. Or, l'adaptation la plus simple s'en fait sur les transformateurs dont le neutre est solidement mis à la masse, et qui trouvent dans cette connexion un élément certain de sécurité. On peut espérer que la solution de la limitation des courants de court-circuit pourra se trouver dans une augmentation générale de réactance inverse, qui comprend notamment les réactances de fuite. Cette réactance, comme l'a dit M. Fallou, est gênante pour échanger de la puissance réactive, mais si cet échange est proscrit en principe, le réglage de tension peut s'accommoder de réactances de fuite élevées, qui contribuent en tout cas à réduire les courants de court-circuits, et non seulement ceux dus à la mise à la terre d'une phase, mais même les courants de court-circuit entre phases.

M. LANGLOIS-BERTHELOT présente la note suivante :

Le rapport de M. Fallou touche à l'un des problèmes les plus importants à l'heure actuelle pour les réseaux urbains : celui de la généralisation de l'interconnexion. Je me propose de reprendre cette question à un point de vue un peu plus général.

Une opinion encore assez répandue jusqu'à ces dernières années était qu'il convenait d'alimenter chaque centre récepteur par un centre générateur directement affecté — tout comme, dans une centrale, on préfère affecter à chaque turbine sa chaudière propre, directement reliée, sans vannes supplémentaires qui sont des causes de trouble possible.

Tout est ainsi très clair.

Mais quand un réseau qui groupe un ensemble de centres générateurs importants alimente un service public, la raison de continuité du service devient prépondérante et fait de l'interconnexion une nécessité — indépendamment des avantages économiques évidents (utilisation optimale des centrales selon leur consommation spécifique, mise en commun des réserves).

Les réseaux américains ont pris une extension croissante et groupent en plusieurs points des distributeurs urbains dépassant le million de kilovoltampères. De plus, la continuité du service est le point d'honneur de leurs sociétés de distribution, dont plusieurs n'ont pas dans leur histoire des dernières années à citer d'interruption dépassant quelques minutes.

Il en résulte que les Américains ont une expérience particulière de l'interconnexion, de tous les incidents auxquels elle peut donner lieu, et de toutes les mesures à prendre pour assurer absolument la continuité du service.

Des appareils oscillographiques inscripteurs à enregistrement automatique ont été installés aux points stratégiques des réseaux, permettant de savoir la vérité (souvent impossible à connaître d'après les rapports des intéressés qui n'ont pas gardé leur sang-froid — ceci n'est pas un reproche, car je ne dis pas que je ferais mieux qu'eux !) — et permettent de savoir plus de choses qu'un observateur ne peut en distinguer à l'œil nu. Ainsi, les nombreux problèmes qui dépendent à la fois des conditions des machines et de celles du réseau, ont pu être analysés. C'est, en l'espèce, la seule méthode scientifique, car ces questions sont souvent inabordables par le calcul. Comme il arrive souvent, le calcul explique les choses après coup. Ce n'est pas si bien que de découvrir une planète dans son cabinet de travail, mais c'est souvent assez pour l'ingénieur.

Les incidents auxquels l'interconnexion apporte une aggravation sont dûs à la répercussion plus étendue des effets d'un court-circuit, qui se font sentir sur tout le système.

Ces effets nuisibles sont :

1° *les effets connus des surintensités* : échauffement des câbles, risque d'explosion des disjoncteurs, chutes de tension nuisibles chez les abonnés.

On y remédie par les moyens signalés dans le rapport de M. Fallou, — emploi de réactances sans fer — tableaux à phases séparées — mise à la terre du neutre par une impédance convenable (dont la détermination précise par le calcul n'est d'ailleurs pas sans soulever des difficultés) ;

2° *les décrochages*, ou phénomènes d'instabilité transitoire, proprement dits.

Le problème de la stabilité transitoire, c'est-à-dire des possibilités de décrochage en cas de perturbation accidentelle sur le réseau, a fait l'objet de nombreuses études et a été discuté ici même à plusieurs reprises.

Je n'entrerai donc à ce sujet dans aucun détail. Je rappellerai seulement l'idée : en cas de perturbation momentanée, l'angle de phase entre les tensions de deux points du réseau varie et peut dépasser un angle limite, que l'on appelle angle limite de stabilité statique. Dans ce cas le système décroche, deux fréquences différentes peuvent se superposer avec les effets connus : fluctuations des lampes, grognement des moteurs, apparition de courants dévattés considérables. Par suite de l'inertie des machines, l'écart de phase présente un caractère oscillatoire. La période et l'amplitude de ces oscillations dépendent de la nature du défaut, de sa durée, de l'amortissement des machines, des régulateurs d'admission des turbines (l'arrivée brusque de fluide dans la roue déterminant une variation angulaire qui peut être aussi importante que les variations de nature proprement électrique).

Il y aura rupture de synchronisme si les conditions sont telles que l'oscillation puisse atteindre la valeur critique.

C'est donc là un phénomène fort complexe. Les Américains ont tenté de l'analyser ; un ingénieur d'une des principales sociétés de construction m'a même affirmé que, dans un cas particulier, six calculateurs spécialistes avaient travaillé pendant six mois pour étudier ce qui se passait dans le premier centième de seconde qui suit la perturbation.

Voyant le problème échapper ainsi à l'analyse, et comprenant cependant l'importance qu'il y avait à le faire toucher du doigt par les exploitants, les ingénieurs de la société Westinghouse ont établi un modèle qui donne une notion qualitative très exacte de ces phénomènes et en met en évidence tous les facteurs. Ce modèle a été décrit par M. DARRIEUS au cours de son intéressante communication ; son intérêt pratique, sur lequel je crois devoir insister, est de permettre aux exploitants de comprendre que dans leur vie d'exploitant ils pourront être amenés à rencontrer ces phénomènes d'instabilité transitoire — et par suite de leur permettre de s'intéresser aux efforts que font les constructeurs pour leur donner une solution. Les Américains ont été ainsi conduits à installer en certains points de leurs grands réseaux interconnectés, des enregistreurs appropriés pour me-

surer les écarts de phase lors des perturbations. L'oscillographe, mis en route par un relais influencé par le défaut, n'enregistre sans doute pas les premières périodes du phénomène, mais il montre ce qui est finalement utile : c'est-à-dire si le système décroche, ou s'il se rétablit et comment.

On peut alors concevoir que l'on arrive à dresser un véritable cahier d'expériences relatant, pour chaque perturbation, toutes les conditions du phénomène, ce qui mettra sur la voie des solutions.

Ceci m'amène à indiquer les moyens actuellement préconisés en Amérique pour maintenir la stabilité en régime transitoire :

1° excitation rapide.

2° disjoncteurs rapides.

L'idée du premier système est d'accroître l'excitation avec toute la vitesse possible au moment d'un défaut, pour le rattraper pendant qu'il est dans la période de départ du régime oscillatoire. La puissance synchronisante augmente et empêche le décrochage.

L'idée du second système est d'éliminer le défaut le plus vite possible pour empêcher l'oscillation de phase d'atteindre sa pleine amplitude.

Dans les deux cas, il s'agit de gagner de vitesse.

Je n'ai pas ici la place de m'étendre sur ces deux solutions, dont la première au moins a déjà été discutée au cours des séances de l'an dernier, il y aurait d'ailleurs encore une discussion utile à continuer.

Mais il convient de remarquer que le problème du décrochage présente une importance qui varie avec le cas particulier au réseau que l'on envisage.

Un réseau urbain alimenté par des centrales thermiques peu éloignées, ne présente pas en général de difficultés de ce côté. Mais dans le cas où ce réseau urbain reçoit un gros bloc de puissance  $W$  venant d'une centrale hydraulique éloignée — et ce cas devient de plus en plus fréquent — le problème prend toute son importance. Analysons-le de plus près.

La puissance  $W$  est transmise par une ligne double, par raison de sécurité.

Chaque ligne transmet  $\frac{W}{2}$  ; le décalage angulaire entre les tensions génératrice et réceptrice a une certaine valeur.

Si une ligne vient à déclencher pour défaut — cas fréquent — la ligne restante doit transporter  $W$ . L'angle doit sensiblement doubler.



D'où variation oscillatoire de l'écart de phase et possibilité de décrochage.

Le phénomène regardé de plus près est d'ailleurs très complexe :

1° Il faut un certain temps pour que la puissance transportée par la ligne passe de  $\frac{W}{2}$  à  $W$  (La puissance totale transmise à la sous-station d'arrivée diminue donc d'abord) ;

2° Les régulateurs de vitesse à la centrale n'ont pas le temps d'agir pendant le court laps de temps ci-dessus ;

3° La chute de tension double quand la ligne unique a pris toute la charge. La tension tend à baisser à l'arrivée. La puissance déwatée de capacité de la ligne baisse suivant le carré. Les kilovoltampères débités par les condensateurs synchrones à l'arrivée baissent aussi. La chute de tension s'exagère, la puissance synchronisante diminue, ce qui tend à favoriser le décrochage.

L'excitation rapide peut alors rétablir la situation par le mécanisme qui a été expliqué. Mais sa nécessité n'apparaît pas absolument évidente, puisque l'écart de phase n'est pas brusque ; en raisonnant sur ces questions, il ne peut être rien dit de précis si on ne se base pas sur des oscillogrammes. Le temps me manque pour analyser d'autres cas de perturbations également caractéristiques.

*Schéma d'interconnexion.* — Lorsqu'il s'agit d'interconnecter un grand réseau de centrales et de sous-stations, il y a différentes manières d'établir les liaisons : on peut n'établir que le minimum de liaisons, ou établir des liaisons surabondantes fermées, soit en permanence, soit seulement à la demande du dispatcher.

Dans l'étude de ce schéma, il faut faire intervenir les différentes considérations que nous avons énumérées ci-dessus.

Le schéma qui paraît en faveur dans les grands réseaux américains est le suivant :

Chaque centrale est divisée en groupes de machines complètement séparés sans aucune connexion électrique entre eux (les barres omnibus sont sectionnées).

Des câbles partent de chaque groupe et vont alimenter les sous-stations. Chaque sous-station reçoit ainsi des feeders provenant de différents groupes générateurs.

La synchronisation se fait du côté basse tension des sous-stations. On obtient ainsi deux avantages :

1° Continuité du service : en cas d'avarie d'un groupe, l'avarie est limitée à ce groupe et non à toute la centrale, chaque sous-station restant alimentée par les groupes voisins ;

2° Réactance élevée en cas de défaut à la sous-station, ce qui permet souvent d'éviter des réactances additionnelles.

Une objection est que les réactances entre groupes générateurs sont appréciables, ce qui diminue la stabilité propre du système en cas de perturbation transitoire, c'est-à-dire favorise les décrochages. Si l'expérience conduisait à des difficultés de ce côté, il y aurait lieu de recourir à l'excitation rapide des générateurs.

*Conclusion.* — Je ne crois pas avoir dépassé le cadre de la question traitée par M. Fallou dans sa présente communication. La limitation des courants de court-circuit est un problème si étroitement relié au problème de la stabilité en régime transitoire, que l'on ne peut pas traiter l'un sans parler de l'autre. Il ne suffit pas de limiter les courants, il faut le faire sans nuire à la stabilité du système et l'emploi de réactances d'interconnexion est sujet à cette réserve.

Cette remarque n'était pas inutile, car beaucoup d'exploitants n'ont pas encore la notion de l'existence de ces questions de stabilité, et ils n'apportent pas toujours à l'étude de ces questions l'esprit de collaboration que M. Fallou, comme moi-même, avons pu constater de l'autre côté de l'Atlantique.

M. FALLOU. — En résumant mon rapport, j'ai expliqué qu'il est, en effet, difficile de traiter la question des court-circuits sans aborder celle de la stabilité, et indiqué pourquoi il m'avait semblé néanmoins désirable de limiter le cadre de cette première étude. La note de M. Langlois élargit la discussion et appelle, dès à présent, à mon avis, quelques remarques essentielles.

M. Langlois nous a parlé beaucoup de ce qui se fait dans les réseaux américains, avec une admiration sans réserve qui laisse penser que la technique française accuse un retard considérable sur la technique américaine. Je crois de mon devoir d'essayer de défendre un peu les réseaux français dont le prestige pourrait souffrir d'une comparaison que j'estime trop dénuée d'impartialité ; je veux surtout protester contre cette opinion si courante, et dont M. Langlois se fait à son tour le rapporteur, d'après laquelle la parfaite continuité de service serait obtenue par les Sociétés d'exploitation américaines dont

plusieurs n'auraient pas connu d'interruption depuis plusieurs années.

C'est évidemment cette opinion que l'on peut rapporter d'un voyage rapide si l'on se contente d'interviews sommaires avec le personnel de ces exploitations ; il faut d'ailleurs louer l'optimisme de ce personnel, dont l'état d'esprit est infiniment préférable à celui que l'on rencontre le plus souvent chez nous où l'on est trop enclin à se critiquer soi-même et à admirer le voisin sans réserve. Mais, en réalité, les distributions américaines, comme les distributions européennes, n'ont pas encore atteint un degré de perfection suffisant pour que les interruptions de service y soient inconnues : des efforts sont multipliés, outre Atlantique comme en Europe, pour améliorer sans cesse les installations, et il est de fait que la continuité du service est la préoccupation essentielle des ingénieurs américains, comme elle est celle des ingénieurs européens. Mais les enquêtes que j'ai menées au cours de mes deux derniers voyages aux Etats-Unis m'ont confirmé que les réseaux américains sont encore le siège — comme les réseaux européens — de nombreux incidents ; il n'est d'ailleurs pas nécessaire de traverser l'Atlantique pour s'en persuader, il suffit de lire les rapports annuels des Sociétés d'exploitation et les articles de la presse américaine où des statistiques d'incidents et d'interruptions sont publiées avec une franchise à laquelle il faut rendre hommage. En fait, la continuité absolue du service est l'apanage exceptionnel de quelques réseaux tout à fait particuliers (anciens réseaux à courant continu Edison) où de très grandes batteries d'accumulateurs peuvent encore suppléer, pendant un certain temps, à une défaillance de l'alimentation primaire.

En ce qui concerne le problème de la stabilité, M. Langlois a justement apprécié le développement des oscillographes à fonctionnement automatique dans les réseaux américains, mais il me semble qu'il a découvert là-bas un type d'appareil qu'il aurait pu voir en fonctionnement en France depuis deux ans, car l'Union d'Electricité n'a pas attendu l'exemple américain pour installer un oscillographe enregistrant automatiquement tous les incidents de son réseau à 60 000 volts. Si ces oscillographes automatiques ne se sont pas développés davantage en Europe, il n'y faut pas voir la faute des producteurs et distributeurs, mais bien celle des constructeurs qui, en dépit de nos demandes répétées, n'ont pas encore cherché à établir un modèle simple et

maniable, pourtant bien facile à réaliser, qui aurait certainement rencontré le plus grand succès auprès des exploitants.

Pour ce qui est des études théoriques sur la stabilité, je crois aussi que M. Langlois a sous-estimé ce qui a pu être fait en France, et particulièrement par les membres de notre Société, où le problème de l'excitation à réponse rapide a été soulevé depuis longtemps, et où des solutions des plus intéressantes — qui nous reviendront sous peu d'Amérique — ont été proposées. Le modèle mécanique de stabilité dont a parlé M. Langlois, n'est-il pas lui-même la réalisation d'un principe exposé par M. Darrieus dès 1925 ?

Dans la dernière partie de sa note, M. Langlois nous parle des schémas d'interconnexion et rappelle le principe de la synchronisation par la charge qui consiste à interconnecter les usines ou fractions d'usines par le réseau à basse tension. Il y a là une solution fort intéressante du problème de la mise en parallèle des usines, mais elle nécessite une constitution très spéciale du réseau que l'on ne rencontre — même en Amérique — que dans quelques centres très particuliers, comme celui de New-York. Je me propose d'ailleurs de revenir quelques jours sur cette question, qui demande à elle seule une longue étude.

M. LANGLOIS. — Je voudrais répondre à M. Fallou, mais il faudrait avoir plus de temps que la discussion n'en comporte. Je dirai seulement que l'idée de dénigrer les ingénieurs français était bien loin de mon esprit.

M. BUNET présente son rapport sur *l'emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution* <sup>(1)</sup>.

M. BOUCHEROT. — Messieurs, après la très intéressante communication de mon ami Bunet, très documentée sur les applications les plus récentes, je pense qu'il vous intéressera de causer un peu de vieilles choses, parce que, d'abord, il y en a beaucoup d'entre vous qui étaient bien jeunes dans ce temps-là et qui ne les ont pas connues. Et puis véritablement, depuis un certain nombre d'années, on parle beaucoup des applications des condensateurs, surtout à l'améliora-

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série, Tome IX, n<sup>o</sup> 96, août 1929, page 853.

tion du facteur de puissance des réseaux et il y a des choses qui sont présentées comme nouvelles, dans la presse électrotechnique, et qui sont très anciennes.

Il est peut-être utile de mettre un peu les choses au point.

Je veux donc rappeler que de 1890 à 1895, j'ai beaucoup écrit dans les revues électriques sur les applications des condensateurs, sur les combinaisons qu'on peut en faire avec des bobines de self-induction, des alternateurs, des transformateurs, etc., je ne vous citerai que les plus importantes, les applications des condensateurs avec des bobines de self-induction. Je les laisserai aujourd'hui, parce que nous devons en parler samedi ; il s'agit de combinaisons pour obtenir des courants constants avec des sources à tension constante.

Mais je rappellerai qu'en 1894, j'ai réalisé des alternateurs, à self inductance variable périodiquement, combinaisons d'alternateurs avec condensateurs qui sont des alternateurs *auto-exciteurs*. Je les ai même présentés à la Société, et j'en ai fait marcher un dans la salle au-dessus, en 1898, il y a presque 32 ans, l'alternateur auto-exciteur à fer tournant. *Il faut pour cela que la self-inductance soit variable.*

La chose est présentée maintenant d'une autre manière, on invoque les deux réactions de l'alternateur — je reparlerai de cela une autre fois d'ailleurs — ce n'est qu'une autre manière de présenter la chose.

J'ai indiqué aussi, en 1893, dans la « *Lumière électrique* », des combinaisons d'alternateurs monophasés avec des condensateurs, dans le but de réaliser des fréquences plus élevées que la fréquence fondamentale de l'alternateur, ceci a été réalisé pour la T.S.F., en Allemagne, par Goldschmidt, 15 ans plus tard.

Je n'avais pas des moyens me permettant de réaliser toutes ces combinaisons. Je rappelle que Goldschmidt en réalisait au contraire un certain nombre, et que ces machines ont même servi contre nous pendant la guerre. Elles ont servi aux Allemands à communiquer avec leurs compatriotes d'Amérique. Il y avait, en particulier, une station à Tuckerton en Amérique qui correspondait couramment, dans les premiers temps de la guerre, jusqu'à ce que l'Amérique soit elle-même entrée en guerre, avec le poste allemand de Hanovre. Ces postes se servaient des alternateurs à réflexions multiples comme ceux que j'avais indiqués en 1893. Il y en a eu d'autres encore.

J'ai aussi à ce moment-là, en 1890 et 1892, dans l'*Electricien* et la *Lumière électrique*, indiqué la possibilité de se servir des condensateurs

pour réaliser le couplage d'alternateurs en tension. Je n'ai pas pu, non plus, faire d'expérimentation ; cela aurait nécessité un matériel formidable. Mais la vérification en a été faite bien longtemps après au Japon par M. Nishi, qui, tout à fait par hasard, a découvert que les alternateurs se couplaient en tension dans certaines circonstances, quand ils restaient isolés, sur des lignes ayant entre elles des capacités. Ceci s'est trouvé accidentellement vérifié, pendant la guerre, vers 1918 ou 19, tandis que j'avais indiqué cela bien longtemps avant.

Mais, c'est surtout en ce qui concerne la grosse question de l'amélioration du facteur de puissance, que je crois intéressant de rappeler les origines.

Cette question préoccupe beaucoup maintenant les électriciens et les distributeurs. J'ai proposé expressément l'application des condensateurs en janvier 1892 dans l'*Industrie Electrique*. J'avais déjà d'ailleurs, en 1890, dans une étude générale sur les combinaisons de self-inductions et de capacités, fait comprendre la possibilité de ces compensations, de ces améliorations, mais j'ai *expressément recommandé* ce qu'on appelle aujourd'hui l'amélioration du facteur de puissance par les condensateurs, en 1892, dans l'*Industrie Electrique*.

J'ai même soutenu à ce propos une polémique avec un lecteur de cette revue. J'ai su, par une indiscretion, que le lecteur anonyme qui me raillait un peu dans sa lettre, c'était Potier.

J'ai essayé d'ailleurs à ce moment-là de réaliser cela dans la pratique, et je m'étais mis en relations avec M. Berthier qui possédait le réseau de distribution du Havre à courant alternatif. Je n'ai pas pu me mettre d'accord avec lui pour ces essais. Et c'est seulement un peu plus tard, vers 1895, que j'ai fait un essai véritable d'application, un essai industriel sur le secteur des Champs-Élysées. J'en ai fait part à la Société (Bulletin de 1898).

Pour ce qui est des condensateurs que j'étais arrivé à réussir, que j'ai essayé de réaliser industriellement à un prix abordable, je dois dire que je n'étais pas loin du résultat que nous signalait Bunet tout à l'heure. J'étais arrivé à un prix de 100 à 120 fr. le kilowatt réactif à la fréquence de 40 p: s pour un coefficient de sécurité de 2, ces prix étaient en francs-or, naturellement, et aujourd'hui cela ferait 500 ou 600 fr à la fréquence de 40 p: s. par conséquent les  $4\frac{1}{5}$  à la fréquence de 50 p: s. Ce sont à peu près les prix pour 200 V aujourd'hui. Naturellement on a amélioré les moyens, les matériaux surtout : évidem-

ment, je m'étais contenté de papier paraffiné, qui m'avait permis d'obtenir ces résultats. Mais le coefficient de sécurité de 2 était insuffisant pour le secteur des Champs-Élysées et les malheureux condensateurs ont pris feu.

J'avais appelé cela « l'accroissement d'utilisation des alternateurs », par l'emploi des condensateurs, ce n'était pas « l'amélioration du facteur de puissance », seulement c'était la même chose.

J'avais envisagé aussi l'emploi des condensateurs en série, ainsi qu'on peut le vérifier.

Je crois que ces petits souvenirs peuvent vous intéresser, et je m'excuse de paraître être venu pour réclamer une priorité, ce qui n'est pas mon genre, mais il est des faits qu'il est nécessaire de rappeler de temps en temps. Si les techniciens ne s'affirment pas eux-mêmes, ne cherchent pas à montrer leur part dans le développement de l'industrie électrique, on les oubliera ! C'est déjà un fait accompli de la part des pouvoirs publics, de ne prendre en considération, en dehors des fonctionnaires, que les financiers et les marchands !

M. DARRIEUS. — Je voudrais signaler une application récente aux Etats-Unis d'un des montages indiqués par M. Boucherot en 1895, et qui permet d'obtenir une transformation de tension (High Voltage Capacitors — *Electric Journal*, oct. 1929). Une chaîne d'isolateurs suspendus, reliée en haut à la ligne à haute tension, en bas à la terre (fig. 1) permet déjà de prélever à une hauteur convenable, par exemple sur le premier élément, une fraction de la tension totale d'autant plus voisine du rapport qui correspond au rang de l'élément que les dispersions de capacité sont plus faibles, ou que la capacité propre de l'élément est plus grande par rapport aux capacités parasites à la masse.

Sous cette forme, le dispositif ne se prête qu'à l'alimentation d'appareils nécessitant une très petite puissance, comme les lampes au néon, tandis qu'il serait séduisant d'en étendre l'emploi à l'alimentation de petites agglomérations rurales. En l'espèce, il s'agissait de postes d'éclairage pour les avions, qui, devant être établis en rase campagne où n'existait aucune ligne de distribution, pouvaient par contre être connectés à une ligne à haute tension, 40 000 ou 100 000 V, passant dans le voisinage.

Mais, la charge d'une telle chaîne simple de capacités provoque une grande chute de tension, tandis que, si, comme l'a indiqué M. Bou-

cherot, on intercale en série sur la connexion une inductance convenable, on peut réduire la chute de tension à celle qui correspond aux pertes du dispositif.

La condition à réaliser est très facile à trouver : elle revient à annuler la tension de court-circuit lorsque les deux extrémités A B sont réunies on a la condition de résonance

$$\omega^2 L (C_1 + C_2) = 0.$$

Ce schéma se réalise avec des capacités qui ressemblent à des isolateurs spéciaux de grande dimension, dont la capacité est de  $0,012 \mu F$ .

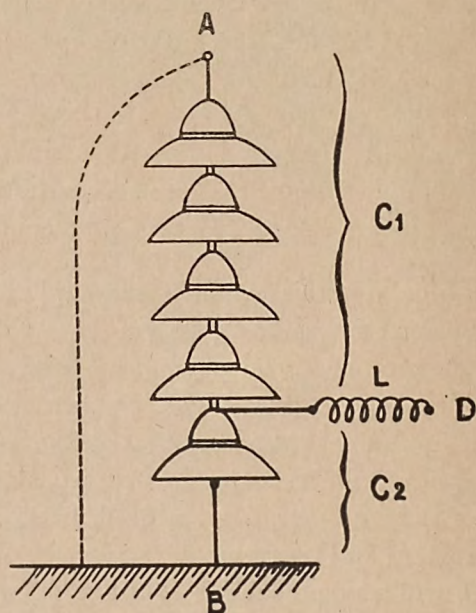


FIG. 1. — Prise de tension sur une chaîne d'isolateurs.

Ces isolateurs ne compromettent pas plus qu'une chaîne ordinaire la sécurité des lignes aériennes. En outre, ce dispositif ne présente pas de pertes à vide, puisque les pertes du condensateur sont incomparablement moindres que les pertes dans le fer d'un transformateur. A vide il n'y a qu'un courant de capacité.

M. FALLOU. — Le schéma indiqué par M. Darrieus est utilisé d'une manière courante pour les bornes des disjoncteurs à haute tension, qui peuvent ainsi servir de transformateurs de potentiel. Une des arma-



tures internes de la borne condensateur est branchée aux appareils d'utilisation à travers une bobine de réactance réglée de manière à compenser la chute de tension.

À l'heure actuelle, tous les interrupteurs construits par la Cie Westinghouse pour des tensions supérieures à 110 000 V sont équipés avec ces bornes, et si l'exploitant désire les utiliser comme transformateur de potentiel, il lui suffit d'ajouter un petit transformateur d'isolement et une bobine de self inductance contenus dans une caisse métallique peu encombrante que l'on fixe au couvercle de l'interrupteur. La General Electric C<sup>o</sup> fournit aussi de pareils ensembles qui permettent de tirer 60 VA par phase en régime de précision pour des bornes à 220 000 V.

M. AILLERET. — Serait-il possible d'avoir quelques données pratiques sur l'importance réelle de la résonance des harmoniques ?

Il faudrait préciser cette importance par rapport à la valeur même de la tension. Je me demande si, à ce point de vue, l'exemple pris tout à l'heure par M. Bunet ne correspond pas à des dispositions anciennes.

D'autre part, si l'amortissement des harmoniques est considérable dans tout le réseau, les surtensions ne sont plus à craindre. Ne pourrait-on donner des renseignements pratiques sur ce point ?

Je crois que ces deux points de vue dominant la question des harmoniques.

M. FALLOU. — J'ai étudié ces résonances il y a déjà quelques années et j'ai cherché quelles peuvent être réellement dans les réseaux les facteurs de surtension pour les fréquences des harmoniques.

J'ai trouvé que les pertes parasites, dont on connaît déjà l'importance pour les courants de fréquence fondamentale, augmentent très rapidement avec la fréquence, de telle sorte que le facteur de surtension qui est généralement maximum pour l'harmonique 3, et diminue ensuite très rapidement avec le rang de l'harmonique de manière à ne guère dépasser la valeur 4. Autrement dit, si la force électromotrice appliquée au réseau contient 3 pour 100 d'harmoniques, la courbe de tension en cas de résonance contiendra 12 pour 100 d'harmoniques. En résumé, le danger de surtension par les harmoniques, de rang égal ou supérieur à 5, est à mon avis tout à fait illusoire.

M. BOUCHEROT — Nous avons eu en 1905 une grande discussion ici. On avait commencé par s'alarmer beaucoup au sujet des résonan-

ces d'harmoniques. Puis, en étudiant la chose de plus près j'ai montré que les dissipations d'énergie tendent à réduire énormément la surtension calculée en ne tenant compte que des simples résistances ohmiques. Maintenant, je trouve qu'on est vraiment un peu optimiste. Il est possible que, dans certaines circonstances, on ait trouvé 4 ou 5 comme facteur de surtension maximum des installations, mais je crois que le facteur de surtension est fonction de l'intensité du courant qu'il augmente avec elle.

Je ne sais pas sur quelle valeur d'intensité M. Fallou a fait ses essais. Si c'était sur de petits courants, il est peut-être dangereux de conclure que les facteurs de surtension seraient les mêmes pour de gros courants. Parce que, quand on chiffre sous forme de résistance les dégradations d'énergie, et en particulier celles qui proviennent de la résistance fictive qu'il faut introduire dans le calcul pour la limite des surtensions, cette résistance décroît beaucoup quand le courant augmente, puisque la puissance ne varie pas tout à fait comme le carré du courant.

Enfin, il est certain qu'on a eu jadis beaucoup trop de crainte des surtensions par résonance, et que les valeurs maxima sont bien inférieures à ces valeurs de 150, 100 qu'on invoquait ; je croyais à des valeurs de 20 ou 30 à cette époque-là ; vous m'avez fait baisser mon estimation jusqu'à 10 ou 15 peut-être, mais pour 5, je suis sceptique.

M. FALLOU. — Je vais résumer en quelques mots les expériences que j'ai pu réaliser, j'en ai d'ailleurs publié les détails à l'occasion de la Conférence des grands Réseaux, en 1925.

Ces essais comportaient deux séries de mesure de nature essentiellement différentes : les unes effectuées avec des courants très faibles, les autres avec des courants d'amplitude élevée. Il s'agissait de déterminer le facteur de surtension d'un réseau comportant un alternateur, un transformateur et un câble.

J'ai d'ailleurs opéré sur des machines de puissances différentes, de 6 000 à 45 000 kVA branchées sur des capacités variables.

La première série de mesures a été effectuée avec de très petits courants. Ces mesures étaient effectuées en introduisant dans ce réseau complexe la force électro-motrice de fréquence variable, d'une hétérodyne et elles consistaient à mesurer par des méthodes bien connues la résistance apparente de l'ensemble. J'ai pu ainsi déterminer quelle est la résistance apparente du réseau en fonction de la fréquence.

A 50 p. s, elle est extrêmement basse, mais elle augmente très rapidement avec la fréquence, de sorte que le facteur de surtension  $\frac{L \omega}{R}$  reste à peu près constant dès qu'on dépasse un certain rang d'harmoniques.

Mais ces expériences ont porté sur des courants extrêmement faibles, elles sont donc sujettes aux objections formulées par M. Boucherot. J'ai donc repris ces expériences avec les mêmes machines, mais dans des conditions différentes et en mettant en jeu de gros courants.

Une de ces expériences consistait à faire tourner la machine à sa fréquence normale, et, la machine étant en court-circuit, à couper le court-circuit ; avec un oscillographe on relevait le courant de capacité du réseau au moment de la coupure du court-circuit ; on obtenait ainsi un relevé du régime transitoire représentant l'oscillation libre du réseau : la valeur de l'amortissement de ce régime transitoire donnait une mesure de la résistance apparente.

Le courant mis en jeu dans la machine était alors de plusieurs milliers d'ampères, tandis qu'il ne dépassait pas quelques centièmes d'ampères dans les expériences précédentes.

J'ai pourtant retrouvé pour les résistances et les facteurs de surtension des valeurs identiques à celles que m'avaient fournies les mesures effectuées avec l'hétérodyne.

Je crois que l'on peut expliquer ce résultat par le fait que les pertes par hystérésis, dont la valeur décroît rapidement lorsqu'on augmente la valeur du courant, restent encore très petites vis-à-vis des pertes parasites qui restent proportionnelles au carré du courant. Ces pertes se produisent, non seulement dans les circuits magnétiques, mais surtout dans l'amortisseur, les frettes, les têtes de bobines, les couvrenroulements des alternateurs, dans la cuve et les masses métalliques des transformateurs ; il ne faut pas négliger non plus les pertes diélectriques des câbles.

Il résulte donc, de tout ceci, que les facteurs de surtension conservent des valeurs très modérées et qu'ils n'augmentent pas d'une manière sensible avec l'amplitude du courant.

M. A. ROTH. — Messieurs, j'ai eu l'occasion de faire des mesures dans les conditions pratiques de l'exploitation. Elles confirment complètement les réflexions faites par M. Fallou, en ce qui concerne la résonances des harmoniques supérieures. Je me rappelle des mesures fai-

tes sur des réseaux de câbles à 10 000 V et à 60 000 V, d'autres sur deux réseaux aériens à 50 000 V et d'autres encore sur un réseau à 120 000 V.

Il est très curieux de constater que tous ces réseaux fonctionnaient avec un régime de résonance propre comprise entre 5, 7 et 11. Bien que le courant créé par les harmoniques supérieures fut une fraction très importante du courant à vide du réseau (il atteignait jusqu'à 100 pour cent de cette intensité), les surtensions, comme le montrait aussi le calcul, étaient tout à fait négligeables. Je crois me souvenir que la plus grande tension d'harmonique n'atteignait que 10 pour cent de la tension de service. Souvent la surtension même est encore moins importante, parce qu'on constate que l'amplitude de l'harmonique est différée par rapport à l'onde fondamentale. Je me souviens d'un cas où, à la suite de cette circonstance, la surtension totale ne dépassait pas 2 pour cent pour une onde de 10 pour cent de l'onde fondamentale.

Il est peut-être intéressant de considérer la source de ces harmoniques supérieurs. J'ai été surpris de constater qu'il s'en produit même dans des réseaux modernes. Il y a deux sources très intéressantes auxquelles on ne pense pas souvent ; l'une est le ferro-magnétisme des transformateurs qui peut créer des harmoniques supérieurs assez considérables ; la deuxième est le court-circuit biphasé dans un réseau triphasé. Les mesures, dont je viens de parler, étaient faites dans ces conditions.

M. GASTINE présente les excuses de M. Barillot, actuellement en voyage, et résume le rapport de celui-ci sur « *les postes extérieurs* » <sup>(1)</sup>.

M. DAGUERRE. — M. Gastine nous a parlé des postes de la Cie du Chemin de fer d'Orléans. La compagnie des Chemins de fer du Midi possède également des postes extérieurs.

Je dis seulement, en passant, qu'on envisage maintenant dans les postes extérieurs l'ossature en ciment armé, et même en ciment centrifugé, pour rendre plus claire l'installation, et pour éviter l'entretien auquel conduisent les ossatures métalliques. Nous avons des ossatures en ciment armé une expérience qui date déjà de trois ans ; elles nous donnent toute satisfaction. Je crois d'ailleurs qu'on y tend de plus en plus.

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série. Tome IX, N° 96, août 1929, page 843.

M. GRATZMULLER présente son rapport sur « *le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes* » (1).

Puis il ajoute :

Depuis la rédaction de mon rapport, M. Leboucher, ingénieur en chef de la Cie du Midi, m'a procuré très aimablement la plus large hospitalité pour que je puisse assister au freinage sur la pente de Capvern d'un train de voyageurs muni du frein continu Westinghouse. J'ai retrouvé vendredi dernier l'accueil aimable auquel j'ai été habitué sur le réseau, que je n'avais pas visité depuis trois ans. Je dois à la vérité de dire que c'est avec le plus grand plaisir que j'ai été favorablement impressionné par les très grands progrès réalisés dans la mise au point et l'entretien du matériel et des installations.

Dans une courte visite au dépôt de Tarbes, j'ai pu constater le soin avec lequel ont progressé les finesses du réglage et des essais préliminaires avant la mise en service des locomotives. La grande amélioration du matériel de début, la qualité du nouveau matériel construit par les C.E.F. sont incontestables.

Cela m'a fait d'autant plus de plaisir que presque tous les ingénieurs du service technique des C.E.F. sont mes anciens élèves. Je peux avoir l'illusion que mes efforts pour développer les études de traction électrique, en France n'ont pas été vains. (Voir ma communication à la S.F.E. en 1920 : *La Technique française et l'Electrification des chemins de fer.*)

Il est aussi très agréable de suivre la marche vers le succès de plus en plus net de la grande imagination réalisatrice de M. Paul, le directeur de la Cie du Midi. Dès le début de ses efforts, il y avait, auprès de lui, la haute figure intègre d'un grand travailleur, M. Bachellery, dont la ténacité avisée et audacieuse n'est aucunement limitée par une extrême bienveillance optimiste, qui lui a permis de conserver une sérénité sympathique dans les difficultés qui n'ont pas manqué de surgir.

Les conceptions les plus avancées, commutatrices à 1500 V par collecteur, convertisseurs à mercure par exemple, ont été tentées et ce qui est plus remarquable, poursuivies. Nous avons vu récemment à la visite d'octobre de nouvelles commutatrices à 1500 V en construction pour le Midi à l'usine de l'Electro-Mécanique du Bour-

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série. Tome IX, n° 98, octobre 1929. page 1.069.

get. Nous parlerons dans la suite de la récupération sur pente consacrée par une pratique déjà longue. Enfin les chemins de fer du Midi sont devenus un grand distributeur d'énergie électrique.

*La Récupération sur la rampe de Capvern.* — La pente depuis Lannemezan jusqu'à Tournay est de 0,015 sur 5 km, puis de 0,032 sur 11 km. Les poids des trains remorqués varient de 200 à 300 tonnes, à la vitesse de 50 km/h maximum. Le courant récupéré est d'environ 600 A. A noter aux 2 extrémités : à Lannemezan sous-station à convertisseurs à mercure, à Tournay sous-station à commutatrices. Le poids des locomotives est croyons-nous d'environ 80 T.

Voici le schéma des circuits principaux pour le freinage (fig. 2).

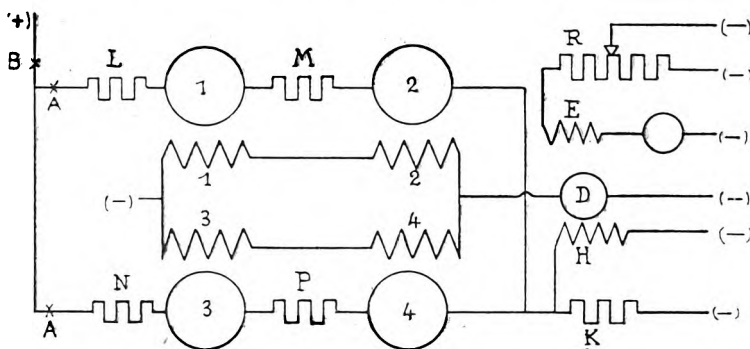


FIG. 2. — Schéma des circuits principaux de freinage.  
Chemins de fer du Midi. Rampe de Capvern.

Ainsi que dans le schéma 2 de principe, fig. 4 du rapport, le circuit des inducteurs est entièrement séparé des dérivations sur le réseau contenant les induits principaux. En effet, dans 2 dérivations partant du pôle + du réseau (fig. 2), il y a dans chacune 2 induits en série, puis les 2 dérivations réunies en un point sont reliées au pôle — du réseau soit à la terre par une résistance stabilisatrice K. Mais, dans chacune des dérivations ci-dessus, il y a encore des résistances intercalées pour atténuer la différence des courants, dans les deux dérivations, supposons-nous. Ces résistances fonctionnent d'ailleurs simultanément en résistances stabilisatrices. Le circuit des inducteurs, ayant les 2 pôles à la terre, présente aussi 2 dérivations : dans l'une se trouvaient les inducteurs des moteurs 1 et 2, dans l'autre les inducteurs des moteurs 3 et 4. Puis les 2 dérivations, après un point commun, sont reliées au sol en passant par l'induit de l'excitatrice D.

Celle-ci comporte 2 excitations, l'une E sous tension constante d'environ 120 V fournie par une génératrice d'un groupe moteur générateur, comportant les dynamos D et C. Un rhéostat R permet le réglage de cette excitation.

Le deuxième enroulement H d'excitation décompoundeur est placé en dérivation sur la résistance stabilisatrice. On voit donc qu'ici, la résistance stabilisatrice intervient pour contribuer à maintenir une certaine tension aux bornes de l'enroulement décompoundeur. Elle limite la surintensité de courant dans cet enroulement pendant les périodes transitoires. La manœuvre de la récupération consiste tout simplement à tourner la manette du contrôleur de commande, après avoir préalablement mis au cran freinage une manette auxiliaire. Des relais A ferment les circuits de débit des induits sur le réseau lorsque les tensions des induits sont convenables.

J'ai pu constater un courant d'environ 600 A, et une tension variant depuis 1 400 jusqu'à 1 700 V. Ces tensions peuvent, m'a-t-on dit, différer et varier jusqu'à 1 800 V.

Nous avons rencontré en descendant un train montant.

L'aiguille de l'ampèremètre ne se déplaçait que lentement.

Le réglage de la vitesse est très progressif et facile aux différents crans. Il y a en B sur la locomotive un disjoncteur à rupture extrarapide qui intercale une résistance puis un autre plus lent qui fait la coupure définitive. Je n'ai fait qu'un parcours mais j'ai pu recueillir un renseignement qui complète mes observations.

M'étant aperçu que le conducteur devait être un ancien mécanicien de locomotive à vapeur, je lui ai demandé quelle était sa préférence, vapeur ou électricité. Sans hésiter, il m'a répondu : « La locomotive à vapeur est plus intéressante car il y a toujours quelque chose qui ne marche pas et l'on peut faire preuve d'initiative, tandis qu'avec ces locomotives électriques, il n'y a qu'à tourner une manette. »

Probablement peut-on simplifier encore et diminuer l'importance des résistances stabilisatrices mais il ne s'agit que de virgules à distribuer plus ou moins heureusement.

*Conclusion.* — Un fonctionnement déjà long de 6 à 7 ans des chemins de fer du Midi prouve que la récupération est sanctionnée par une longue pratique.

D'ailleurs, la récupération se répand. Les chemins de fer du Maroc l'utilisent *très avantageusement*. Les trains descendant sont en effet très chargés de minerai. La Cie P.-L.-M. l'expérimente, M. Bergeret suit les essais. Espérons que la Cie P.-L.-M. voudra bien nous entretenir des résultats qu'elle obtient.

M. Niqueux, pour mon retour, m'a offert aimablement un permis de monter sur la locomotive du train qui m'a ramené à Bordeaux. J'ai pu encore constater le fonctionnement tout à fait normal, cette fois en palier, d'une locomotive à axes verticaux ainsi que la docilité parfaite du pantographe sur la ligne de contact, ligne aérienne tenue par les élégants supports en ogive d'une légèreté impressionnante.

Mes remerciements à M. Ferrand qui m'a aimablement éclairé sur certains points de vue et confirmé dans mon opinion sur d'autres.

M. BACHELLERY. — Messieurs, il m'a été très agréable d'entendre M. Gratzmuller faire justice d'une légende que j'ai rencontrée un certain nombre de fois depuis quelques années, à savoir que la Cie du Midi a tendance à abandonner le freinage par récupération.

La Cie du Midi étant le réseau européen qui a le plus d'expérience du freinage électrique à courant continu à haute tension, il peut être mauvais qu'une légende de ce genre puisse s'établir.

En réalité, M. Gratzmuller vous l'a dit tout à l'heure, la Cie du Midi a actuellement 50 locomotives munies du freinage par récupération, qui assurent le service des trains de voyageurs sur sa grande ligne des Pyrénées. Les trains descendent en utilisant uniquement le freinage électrique de Capvern à Tournay ; 10 km en déclivité de 33 mm par mètre. Cela fonctionne depuis 7 ans, et on n'a jamais eu une dérive ni un accident quelconque avec ce mode de freinage. On peut donc dire qu'il a fait ses preuves.

Si, sur des séries de locomotives construites ultérieurement, la Cie du Midi a substitué le freinage rhéostatique au freinage par récupération, c'est que ces locomotives étaient destinées à remorquer des trains de marchandises qui n'ont pas le frein à air comprimé, et qu'il avait paru préférable, dans ces conditions, de disposer d'un frein électrique indépendant du courant de ligne. Mais cela ne veut pas dire que la Cie du Midi considère le freinage par récupération comme devant être abandonné.

Il a, en effet, un avantage très précieux, qui est de permettre de développer une puissance de freinage plus grande que celle du frein-



nage rhéostatique, étant donné que celui-ci est limité par le poids de résistance qu'on peut placer sur une locomotive. De ce fait, le freinage rhéostatique qui a, par ailleurs la supériorité d'être complètement indépendant de la tension en ligne, ne permet pas, dans beaucoup de cas, de descendre sur les fortes déclivités la charge totale correspondant à l'adhérence de la locomotive, alors que ce résultat peut être obtenu avec le freinage par récupération.

C'est avec raison que M. Gratzmuller n'a pas trop appuyé sur les avantages que l'on peut attendre de la récupération, du fait de la restitution de puissance au réseau. En fait, l'expérience prouve que sur un réseau comme le nôtre, comportant une grande longueur de lignes électrifiées de caractères très divers, la puissance qui est renvoyée aux sous-stations est extrêmement minime, et pratiquement négligeable.

L'énergie récupérée est en effet dissipée en grande partie dans les lignes de transmission, ainsi que dans la résistance stabilisatrice dont vous a parlé M. Gratzmuller. En résumé, le grand avantage de la récupération, c'est de permettre au réseau de disposer sur les fortes pentes d'un moyen de freinage qui peut être poussé jusqu'à la limite d'adhérence de la locomotive.

Lorsque, dans un avenir assez prochain, les trains de marchandises seront munis du frein continu à air comprimé, la question du retour au freinage par récupération sur les locomotives remorquant ces trains se posera très sérieusement pour la Cie du Midi.

M. GRATZMULLER. — Je profite également de la circonstance pour faire remarquer qu'en 1913, lorsque lors du Congrès des Anglais j'ai dit que l'électrification de réseaux quelconques pouvait conduire à des distributions d'énergie électrique, et j'ai dit également que les convertisseurs à mercure dans l'avenir pourraient peut-être justifier le choix du courant continu en traction. Or, le réseau du Midi n'est plus seulement un réseau de traction électrique, mais c'est un réseau créateur d'énergie électrique considérable, et c'est encore une des initiatives remarquables de ses dirigeants.

M. DAGUERRE. — Je remercie M. Gratzmuller, je suis très heureux d'entendre dire du bien du réseau du Midi. C'est le premier en France qui ait poussé l'électrification au point où elle en est, et qui a donné les résultats dont a bien voulu parler M. Gratzmuller et que M. Ba-

chellery vient d'appuyer avec l'excessive modestie que nous lui connaissons.

M. LARTIGUE. — Messieurs, nous avons entendu avec beaucoup d'intérêt M. Gratzmuller parler de la récupération appliquée à la traction électrique sur les grands chemins de fer ; il est une autre utilisation du même principe qui mérite aussi d'être citée ici, c'est son application aux unités de moindre importance, telles que les automotrices de tramways.

Il y a longtemps que la question de la récupération s'est posée pour ce matériel. Cela a commencé, en 1895, avec les voitures à accumulateurs équipées par M. Sarcia pour la ligne Paris-Saint-Denis. D'autres applications fort intéressantes ont été réalisées, en Amérique par M. F. Sprague, en Angleterre par M. J. S. Raworth. Ce dernier a notamment fait équiper vers 1903-1904, sur les réseaux de Devonport et de Gravesend, des automotrices avec moteurs compound qui ont donné un pourcentage de récupération tout à fait considérable, atteignant 20 à 30 pour 100 sur certaines lignes à profil accidenté (voir *The Tramway and Railway World*, 8 septembre 1904). Mais ces essais ont été abandonnés très vite après leur réalisation, parce qu'à cette époque les procédés techniques de construction des moteurs de traction ne permettaient pas d'y utiliser avec sécurité les enroulements compound, qu'en 1895 M. Ernest Gérard avait déjà préconisés en Belgique. On ne disposait pas alors de matières isolantes comparables comme qualité à celles que l'industrie possède actuellement. On n'avait pas non plus généralisé l'emploi de l'autoventilation, ni celui des pôles supplémentaires qui améliorent de façon si considérable la commutation des moteurs. Il s'ensuivait que de violentes étincelles au collecteur d'une part, la destruction des enroulements à fil fin d'autre part, causaient de graves ennuis d'exploitation. L'adoption des robustes moteurs à enroulement série étant devenue, de ce fait, absolument générale, on a pendant longtemps renoncé à employer la récupération dans la petite traction.

Depuis quelques années, la question est revenue à l'ordre du jour, dans des conditions bien plus favorables que jadis. Ainsi, la Compagnie Générale Française de Tramways a mis en service sur son réseau de Marseille, il y a trois ans environ, des électrobus à trolley « Vetra-Thomson ». Ces électrobus circulent sur la ligne d'Aubagne à Gême-

nos et à Cuges, en récupérant d'une façon absolument régulière. Leurs moteurs compound se comportent parfaitement, leurs équipements à contacteurs et à commande au pied sont très simples. Des électrobus tout semblables seront prochainement mis en service sur deux lignes départementales en Savoie.

Encouragée par les bons résultats de ses électrobus, la Cie Générale Française de Tramways a entrepris l'utilisation de l'enroulement compound sur des voitures de tramways. D'autres Compagnies l'imitent. Il n'est pas douteux qu'au cours de l'Assemblée technique de l'Union des Voies Ferrées de France, qui va se tenir à Alger dans le courant du mois de janvier prochain, il sera beaucoup question de la récupération appliquée aux tramways, comme mode de régulation et comme mode de freinage, grâce à l'emploi de moteurs compound.

Cela n'a peut-être pas l'importance impressionnante des résultats que la Cie des Chemins de fer du Midi a obtenus en matière de grande traction. J'estime néanmoins que cela devait être signalé à l'occasion de la communication de mon ami M. Gratzmuller.

M. GRATZMULLER. — Je crois qu'en tramways et en métropolitains, la récupération jusqu'à l'arrêt sera plus complexe, mais je crois que c'est encore beaucoup plus important, et je me souviens qu'à la suite d'une communication en 1913 de M. Legouez sur les essais de récupérations faits par Jeumont au Métropolitain, M. Mariage m'a demandé si la récupération pouvait être appliquée aux tramways ? Je lui ai répondu : « Peut-être, un jour, dans 20 ans ». — Or, il y a de cela 16 ans.

Je suis persuadé que, comme toujours, il y a un décalage. Les opinions s'établissent par ondes, on s'emballe pour la récupération, puis on la bat en brèche. Mais je crois que le moment arrive où elle va s'imposer et je crois, en particulier, que M. Pestarini nous en exposera une des raisons.

---

---

**5<sup>e</sup> SECTION. — TÉLÉGRAPHIE. TÉLÉPHONIE. TRANSMISSION  
PAR ONDES**

---

SOMMAIRE

- 1<sup>o</sup> Présentation du rapport de M. SALOMON sur l'évolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques. — M. REYNAUD-BONIN : importance de la puissance consommée, p. 320.
- 2<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. CHAUCHAT sur les alliages à haute perméabilité. — M. CHAUCHAT : résumé de son rapport. — M. LOUBRY : variation de la perméabilité dans les transformateurs téléphoniques. — M. DEMONTVIGNIER : perméabilité apparente dans le cas d'un entrefer de section différente de celle du circuit magnétique, p. 321.
- 3<sup>o</sup> Présentation du rapport de M. VILLEM sur la liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées. — M. REYNAUD-ROBIN : considérations sur le trafic, p. 327.
- 4<sup>o</sup> Discussion du rapport de M. FAYARD sur la transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes. — M. CLAVIER : nécessité de l'emploi d'un modulateur spécial. — M. CAHEN : intelligibilité et netteté dans les transmissions téléphoniques. — M. REYNAUD-BONIN : système Poirson, p. 328.
- 5<sup>o</sup> Présentation du rapport de M. DEMONTVIGNIER sur une contribution à l'étude du filtrage des courants redressés, p. 331.
- 6<sup>o</sup> Présentation du rapport de M. BONNIN sur la protection du synchronisme sur les transmissions Baudot-Verdan. — M. REYNAUD-BONIN : analogie avec les récepteurs du Dispatching System, p. 331.

Présidence de M. REYNAUD-BONIN,

*Directeur des Services téléphoniques de Paris*

M. REYNAUD-BONIN. — La première communication inscrite à l'ordre du jour est celle de M. Beauvais sur les ondes de 0,10 et 0,20. Elle a paru dans le bulletin du mois de mai de la Société, et M. Beauvais s'est fait excuser.

M. SALOMON présente son rapport sur *l'évolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques* <sup>(1)</sup>.

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série. Tome IX. n<sup>o</sup> 96, août 1929. page 897.

M. REYNAUD-BONIN. — Je remercie M. Salomon des précisions qu'il nous a données sur l'évolution des procédés de fournitures de courant dans les centraux téléphoniques de Paris. Il connaît fort bien le sujet, puisque depuis plusieurs années il fait ces installations. Il nous a montré que l'on a été amené à commander à l'industrie électrique des machines plus largement dimensionnées que celles que l'on faisait précédemment pour obtenir du courant sans harmoniques gênantes pour le téléphone; et en même temps que l'on a étudié des dispositifs très ingénieux pour la marche du téléphone en courant direct sur dynamo.

Je crois que cette communication aura été particulièrement curieuse pour beaucoup de membres de la Société, qui ne s'imaginaient pas que le téléphone demandait un courant si important. Les chiffres de 30 000 kW que l'on doit atteindre à Paris prouvent que, quoique le téléphone travaille sur de tous petits courants électriques (50 à 60 milliampères qui arrivent à l'abonné) il finit par absorber un courant énorme.

M. CHAUCHAT présente son rapport sur *les alliages à haute perméabilité* <sup>(1)</sup>.

M. LOUBRY présente la note suivante sur *la variation de la perméabilité dans les transformateurs téléphoniques*.

Il est possible de suivre, dans le plan du cycle d'hystérésis, les variations de la perméabilité du fer des transformateurs téléphoniques dont le courant primaire comprend une composante continue. L'aperçu ci-après conduit à des remarques qui peuvent être utiles dans la recherche des perfectionnements à apporter à ces transformateurs eux-mêmes, et aux alliages qui constituent leur circuit magnétique. Il semble que la question pourrait être approfondie avec intérêt.

#### *Déplacement des cycles décrits par le Fer.*

##### *Variation de la perméabilité alternative.*

Considérons un transformateur téléphonique comprenant un circuit magnétique avec ou sans entrefer, et ses deux enroulements, primaire et secondaire, bobinés sur une section de fer constante S.

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série, Tome IX, octobre 1929, n° 98, page 1091.

Les valeurs, dans cette section, de l'induction  $B$  et du champ  $H_b$  créé par les enroulements, déterminent dans le plan  $(B, H_b)$  un point qui représente l'état magnétique du fer ; et les courbes décrites par ce point permettent de suivre les variations de cet état magnétique.

Le fer, neutre à l'origine, a été soumis depuis la mise en fonctionnement du transformateur à diverses valeurs de  $H_b$ , à la suite desquelles nous pouvons imaginer que, pour un courant primaire se réduisant à sa composante continue, le point  $M$  figuratif de l'état magnétique du fer se trouve en  $M_0$  (fig. 1) sur un certain cycle d'hys-

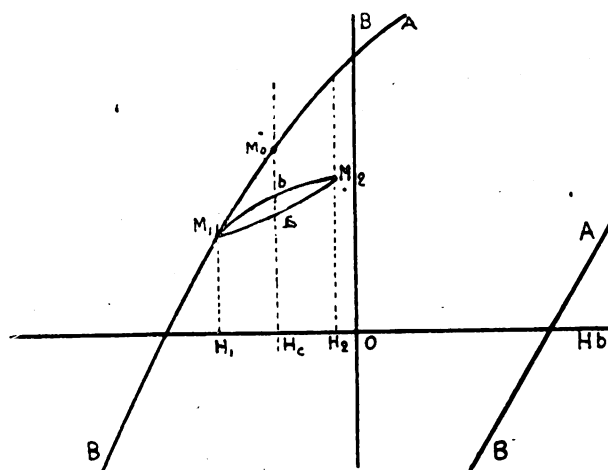


FIG. 1.

térésis  $M, A, B$ . Son abscisse  $H_c$  représente le champ continu correspondant.

Supposons maintenant que la composante alternative du courant primaire vienne à agir. Au champ  $H_c$  se superpose un champ alternatif qui fait se déplacer le point  $H$  périodiquement entre  $H_1$  et  $H_2$ . Lorsque  $H$  va de  $H_c$  à  $H_1$ , le point  $M$  suit le cycle d'hystérésis  $A, B$  de  $M_0$  en  $M_1$ . Mais lorsque  $H$  revient de  $H_1$  en  $H_2$ , le point  $M$  quitte le cycle  $A, B$  pour décrire une nouvelle courbe  $M_1aM_2$ . Puis quand  $H$  parcourt  $H_2H_1$ ,  $M$  revient en  $M_1$  par le chemin  $M_2bM_1$ . Si le point  $H$  continue ses oscillations entre  $H_1$  et  $H_2$ , le point  $M$  décrit le petit cycle d'hystérésis  $M_1aM_2bM_1$  <sup>(1)</sup>.

(1) En réalité le cycle n'est bien déterminé qu'après plusieurs oscillations.

D'autre part, si l'on voulait écrire les équations qui régissent le fonctionnement du transformateur, on serait amené pour exprimer la valeur de la force électromotrice induite, à introduire le facteur

$$\frac{dB}{dt} = \frac{dB}{dH} \times \frac{dH}{dt}$$

c'est à dire :

$$\frac{dB}{dt} = \mu_a \times \frac{dH}{dt}$$

$\mu_a$  désignant ce qu'on a appelé la perméabilité alternative.

Mais  $\mu_a$  n'est pas autre chose que la pente de la tangente à la courbe décrite par le point M.

Reportons-nous au petit cycle décrit par M (fig. 2) nous remarquons:

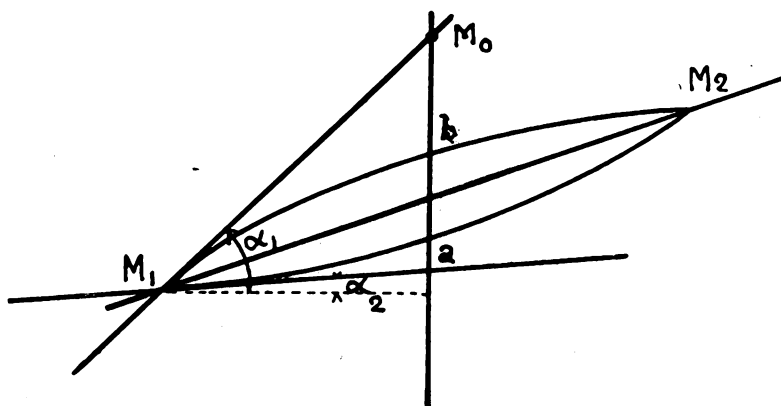


FIG. 2.

que la perméabilité instantanée varie tout le long du cycle en restant comprise entre deux limites ;

qu'aux points  $M_1$  et  $M_2$  elle subit une discontinuité ;

qu'elle est très différente et beaucoup plus faible à certains moments que celle de la branche du cycle A,B.

Nous caractériserons le cycle  $M_1aM_2bM_1$  par la pente  $\mu$  de son axe  $M_1M_2$ , pente qui est comprise entre les limites de  $\mu_a$ .

Cela posé, admettons que l'amplitude de la composante alternative du courant primaire vienne à augmenter. Le point H se déplacera dorénavant entre de nouveaux points  $H'_1$  et  $H'_2$  (fig. 3). Le point M quitte alors le cycle  $M_1aM_2bM_1$ , et, par un chemin qui dépend de sa position au moment de la variation d'amplitude, vient passer en  $M_1$  pour décrire  $M_1M'_1$  et venir parcourir le nouveau cycle  $M'_1aM'_2b'M'_1$ , caractérisé par la nouvelle valeur  $\mu'$  de la pente de son axe  $M'_1M'_2$ .

Admettons enfin que l'amplitude de la composante alternative du courant primaire diminue et redevienne telle, que  $H$  oscille entre  $H_1$  et  $H_2$ . Le point  $M$  change encore de cycle, mais la nouvelle courbe qu'il décrit reste à l'intérieur de  $M'_1 a' M'_2 b' M'_1$  et prend, suivant la position de  $M$  au moment du changement d'amplitude, une position comprise entre les cycles  $M''_1 M''_2$  et  $M'''_1 M'''_2$ .

Ainsi une augmentation d'amplitude du courant alternatif fait descendre le petit cycle parcouru par le point  $M$ , mais une diminution de cette amplitude ne le fait pas remonter. A partir du moment où le transformateur a été soumis à l'amplitude maximum qui peut se pré-

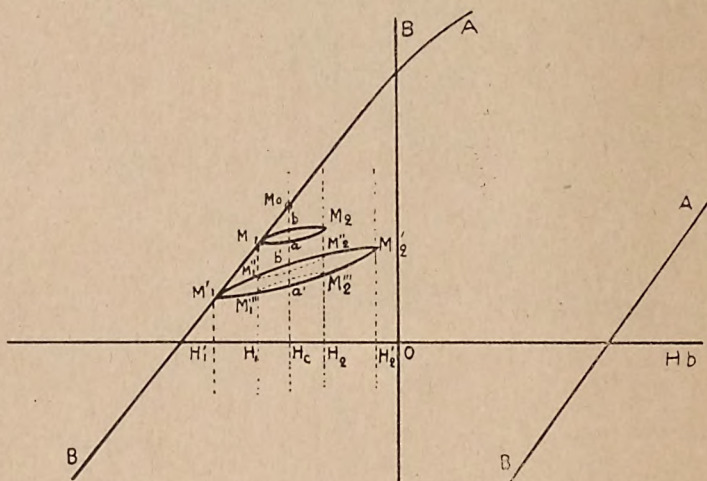


FIG. 3.

senter, une sorte de stabilisation s'opère, telle que les cycles parcourus ne s'écartent plus sensiblement les uns des autres. Il est vraisemblable qu'à partir de ce moment, on peut prendre dans les calculs pour valeur de la perméabilité la pente de l'axe du cycle  $M'_1 M'_2$ .

#### *Courbes secondaires d'hystérésis. Leur intérêt*

Il y a intérêt à ce que  $\mu_a$  soit le plus grand possible et il faut aussi, pour que le fonctionnement du transformateur soit satisfaisant, qu'il varie peu. Il sera donc indiqué d'étudier en détail comment se répartit le long de la branche du cycle principal A,B, la pente de l'axe des petits cycles qui y ont leur sommet.



Il faut remarquer que ces cycles dépendent également de la position du point  $M_0$ , c'est-à-dire de la valeur du champ continu. Mais on peut voir, sur la figure 4, que de deux points différents  $M_0$ ,  $M'_0$ , on

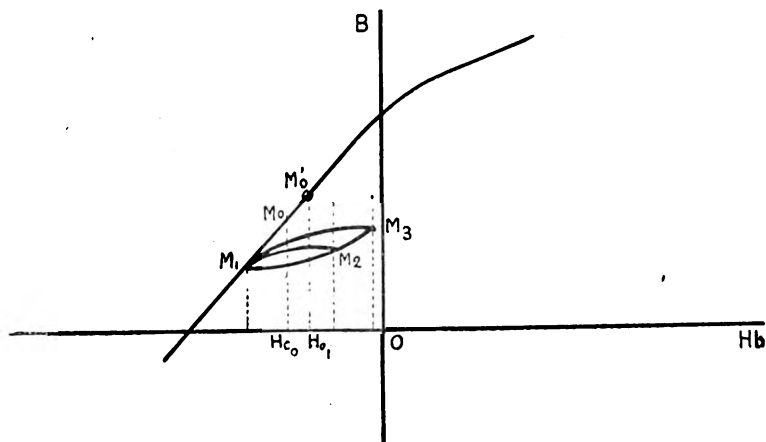


FIG. 4.

peut, pour des valeurs convenables des champs alternatifs, aboutir à des cycles qui empruntent la même courbe le long de leur branche inférieure. L'étude dont il est question ci-dessus devrait donc se

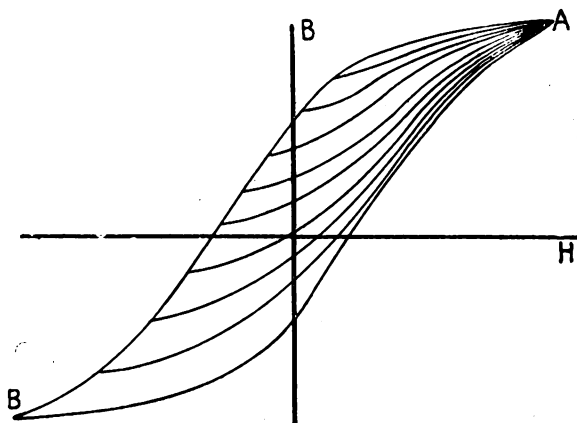


FIG. 5.

ramener à celle du système des courbes secondaires que le point figurant l'état magnétique est susceptible de décrire à l'intérieur du cycle AB (fig. 5).

Il y aurait peut-être intérêt à chercher comment ces courbes se déforment quand le cycle varie pour tendre vers le cycle d'hystérésis limite.

En ce qui concerne les transformateurs, ces courbes permettraient de choisir une région favorable à leur fonctionnement. Elles permettraient, d'autre part, de différencier les alliages magnétiques les meilleurs correspondant aux courbes secondaires dont la pente est la plus grande et le moins variable de l'une à l'autre.

*Remarque.* — En toute rigueur il conviendrait, dans le cas d'un circuit magnétique avec entrefer faisant apparaître un champ démagnétisant, de porter en abscisse, non pas le champ créé par les enroulements  $H_b$ , mais le champ  $H_r$  résultant de la combinaison du précédent avec le champ démagnétisant. L'expression vraie de la perméabilité dont il est question est en effet  $\frac{dB}{dH_r}$ . Le raisonnement ci-dessus reste vrai ; en remplaçant  $H_r$  par  $H_b$  nous remplaçons le cycle d'hystérésis vrai par un autre dont l'allure dépend de la forme du circuit magnétique, une première fois parce que le cycle d'hystérésis vrai en dépend, et une seconde fois parce que le champ démagnétisant en est aussi fonction. Cette circonstance ne doit pas être perdue de vue si l'on étudie l'influence de la forme du circuit magnétique sur les courbes secondaires d'hystérésis.

M. DEMONTVIGNIER. — Je voudrais faire remarquer à M. Chauchat que la définition de la perméabilité apparente ne s'applique que si l'entrefer a la même section que le circuit ferro-magnétique lui-même. Or, dans bien des cas, il n'en est pas ainsi.

Par exemple, dans le cas des bobines de self inductances constituées par un circuit magnétique de tôles empilées, et par un entrefer constitué par de l'air, il y a entre les deux sections un rapport égal au coefficient de foisonnement des tôles ; or, quand on fait des calculs de self-induction avec exactitude, on s'aperçoit que cette différence entre les sections est susceptible, si on n'en tient pas compte, de fausser d'environ 20 pour cent la valeur des coefficients de self-induction qu'on obtient.

Il est donc indispensable de faire entrer le coefficient de foisonnement des tôles dans la définition de la perméabilité apparente.

D'après ce qu'a dit M. Chauchat, dans le cas des circuits magnétiques américains qui font l'objet de cette communication, générale-

ment le coefficient est très voisin de 1, à cause de l'absence de papier entre dans les tôles ; par contre dans les circuits magnétiques utilisés généralement, en Europe, où l'on isole plus volontiers au papier, il n'en est pas de même.

M. REYNAUD-BONIN. — Je remercie M. Chauchat, M. Loubry et M. Demontvignier de ces observations très intéressantes qu'ils nous ont faites des alliages à haute perméabilité. C'est un problème tout à fait à l'ordre du jour. Il est certain que nous verrons d'autres alliages présentant des propriétés beaucoup plus parfaites que celles des alliages connus à l'heure actuelle, et en particulier on arrivera à faire des alliages à haute perméabilité dont la courbe de perméabilité sera moins irrégulière et d'une croissance beaucoup plus constante, surtout dans une échelle d'abscisses plus large que celle que nous possédons actuellement.

Dans l'avenir nous aurons encore d'autres communications très intéressantes sur cette question.

M. VILLEM présente son rapport sur *la liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées* <sup>(1)</sup>.

M. REYNAUD-BONIN. — Je remercie M. Villem de sa communication, extrêmement intéressante, et qu'il nous a présentée d'une façon très agréable. Il s'agit d'une réalisation de la plus haute importance, et qui en même temps par beaucoup de points a des détails extrêmement ingénieux.

Quant au trafic dont M. Villem nous disait un mot tout à l'heure, je sais qu'il augmente toujours, et que certainement, si les débouchés à Buenos-Ayres étaient semblables à ceux que nous avons à Paris, il se ferait de suite une poussée du trafic parce que, ainsi que le disait M. Villem, on ne dispose actuellement à Buenos-Ayres que d'une cabine téléphonique publique sans liaison avec le réseau téléphonique de la ville, ni avec l'arrière-pays.

Malgré cela, le trafic est déjà développé ; de plus, le procédé à ondes courtes a donné un résultat extrêmement intéressant en permettant de réaliser les communications à un tarif bien inférieur à celui im-

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, Tome IX, 4<sup>e</sup> Série, n° 98, octobre 1929, page 1107.

posé par les ondes longues, en sorte que cette liaison est réellement à la portée d'une grande majorité de commerçants et d'industriels

M. FAYARD présente son rapport sur *la transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes* <sup>(1)</sup>.

M. CLAVIER. — Je voudrais demander quel degré de secret cette méthode peut assurer ? Parce qu'en somme, c'est une méthode qui me paraît seulement amener plus de discrétion dans la communication. Elle nécessite, à la réception, l'emploi d'un appareillage spécial, mais elle n'assure pas un secret bien rigoureux et ne me semble pas permettre de changer de code.

M. FAYARD. — Si on ne dispose pas de ce matériel, il est difficile de reconstituer par soi-même la communication, de la rendre intelligible. Ceci résulte d'expériences ; en effet dès l'instant où l'on décale les fréquences de la parole, par exemple de 400 p: s il ne reste plus que 50 pour 100 d'intelligibilité. Si on accroit le décalage et qu'on le porte à 1 000 p: s l'intelligibilité n'est plus que de 30 pour cent. C'est ainsi, que dans le cas de l'émission radioélectrique, on a jugé suffisant de donner un décalage systématique de 1 000 p: s appliqué suivant une cadence déterminée pour conserver l'inintelligibilité de l'émission écoutée sur matériel de réception habituel.

M. CLAVIER. — Comment ces résultats sont-ils évalués ?

M. FAYARD. — On mesure cette intelligibilité à l'aide de méthodes semblables à celles utilisées en téléphonie pour la vérification des appareils et des lignes. On fait parler successivement un certain nombre d'opérateurs ; le texte dont ils font la lecture étant composé de syllabes choisies à l'avance suivant une certaine loi. Par exemple dans une page de texte quelconque on tracera une ligne verticale ou oblique et on dressera la liste de toutes les syllabes rencontrées par la ligne. Ce sont ces syllabes qui, énoncées par un ou plusieurs opérateurs à l'entrée du système, sont écoutées par un autre groupe d'opérateurs à sa sortie. Le nombre de syllabes exactement comprises par ce dernier groupe sur 100 énoncées par le premier, conduit à la

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série, Tome IX, n° 98, octobre 1929, page 1146.

mesure de l'intelligibilité du système en pour cent. Si sur cent syllabes émises les  $\frac{2}{3}$  des opérateurs en ont compris 3 ou 4, on dira que l'intelligibilité est de 3 ou 4 pour cent.

M. CLAVIER. — Je voudrais savoir si pour déchiffrer la communication il suffit d'introduire un modulateur dans un appareil de réception ordinaire ?

M. FAYARD. — Oui, on est conduit à introduire un modulateur et un filtre pour déchiffrer une communication.

M. CLAVIER. — Cet appareillage a-t-il besoin d'être aussi soigné que celui que vous avez exposé pour qu'on puisse comprendre quelque chose ?

M. FAYARD. — Oui, parce que, si on n'adopte pas les dispositions voulues, certaines bandes de fréquences parasites dont j'ai parlé rapidement, telles que celles correspondant aux doublages et aux triplages des fréquences mises en jeu, viennent couvrir et dénaturer les bandes utiles, elles gênent considérablement la bonne intelligibilité de la réception.

Aussi, dans le cas d'un récepteur ordinaire avec ou sans filtre, l'emploi d'un modulateur qui n'aurait pas les propriétés spéciales que nous avons exposées, ne permettrait pas de conserver l'intelligibilité de la parole.

M. CLAVIER. — S'il en est ainsi je considère cette méthode comme très intéressante.

M. CAHEN. — A propos de cette intelligibilité, il y a eu des discussions dans les Comités Internationaux, et je crois que ce que M. Fayard appelle l'intelligibilité, c'est plutôt la netteté.

La méthode de M. Fayard consiste à employer des syllabes par elles-mêmes dépourvues de sens, au hasard. C'est un test de la qualité de la transmission, mais non de l'intelligibilité, car, comme son nom l'indique, l'intelligibilité fait appel à l'intelligence, et lorsque l'on écrit des phrases qui ont un sens, l'esprit comble une partie des lacunes de la transmission, le critérium d'une transmission doit éliminer le plus possible l'intelligence de l'écouteur. C'est pourquoi il est préférable d'employer dans le cas présent le mot netteté.

Par exemple, on fait souvent des expériences dans toutes les langues, et on a constaté que quand on a une netteté de 60 pour cent dans le sens où M. Fayard disait l'intelligibilité, en fait, la communication était parfaitement perçue.

M. REYNAUD-BONIN. — C'est sans doute la raison pour laquelle l'on est allé jusqu'à augmenter de 2 000 p: s toutes les fréquences de base, afin que ce que nous appelons couramment netteté tombe très bas.

M. CAHEN. — Il faut que la netteté soit inférieure à 30 pour cent pour que la conversation soit impossible.

M. REYNAUD-BONIN. — C'est bien ce que semble nous avoir dit M. Fayard.

Le système décrit est-il en exploitation réelle, ou encore à l'essai ?

M. FAYARD. — Il n'a été jusqu'à présent qu'expérimenté, mais il doit être mis en exploitation.

M. REYNAUD-BONIN. — Sur les voies radio-électriques ne pourrait-on pas envisager une application de radiophonie multiple par ondes porteuses ?

M. FAYARD. — Nous restons dans le domaine des fréquences audibles. Les deux communications occupent, en effet, uniquement le spectre de 100 à 5 000 p: s, susceptible d'être directement appliqué aux circuits téléphoniques dans la généralité des cas. En ce qui concerne l'émission radioélectrique, il n'est pas question d'utiliser des ondes porteuses différentes, comme le font certains systèmes étrangers, pour transmettre simultanément plusieurs communications. Le but de ce système, est d'employer au mieux une bande de fréquence s'étendant de 100 à 5 000 p: s sans imposer de conditions spéciales à l'émetteur radioélectrique et tout en réalisant dans cette bande deux communications inintelligibles sur récepteur habituel.

M. CAHEN. — Le système publié jadis par M. Poirson a-t-il reçu des applications courantes ?

M. REYNAUD-BONIN. — Je n'ai jamais entendu dire que le procédé Poirson ait reçu des applications courantes. Il s'agissait d'un interrupteur tournant qui hachait la parole et en renversait le sens toutes

les demi-ondes à la fréquence de 400 p: s. A l'autre extrémité il y avait un autre organe synchrone.

Je crois que le système de M. Poirson avait été examiné pour des fins militaires, et c'était un matériel assez robuste, qui était considéré comme d'un emploi relativement facile sur des lignes militaires, où l'on veut garder un secret parfait. Comme la rotation était assez rapide, la partie restituée devait avoir une intelligibilité suffisante. Mais il n'a jamais été question avec ce système d'obtenir, à la réception, un timbre ou une intelligibilité absolument parfaits.

Je n'ai jamais entendu dire qu'au point de vue de la téléphonie commerciale, il ait été mis en exploitation.

M. DEMONTVIGNIER présente son rapport sur une *contribution à l'étude du filtrage des courants redressés* (1).

M. REYNAUD-BONIN. — Sur certains points la communication de M. Demontvignier rejoint celles de M. Chauchat et de M. Salomon et elle les complète très heureusement. Enfin, M. Demontvignier nous a apporté des renseignements, à mon avis très intéressants et inédits en France sur des résultats obtenus par des filtre à résonance en Angleterre pour étouffer des harmoniques gênantes qui produisaient de l'induction sur une ligne téléphonique.

C'est évidemment une question très importante, et dont nous nous occuperons encore plus tard.

M. BONNIN présente son rapport sur la *protection du synchronisme sur les transmissions Baudot-Verdan* (2).

M. REYNAUD-BONIN. — Je remercie M. Bonnin de sa communication très intéressante, c'est un sujet qui est difficile à exposer, étant donné que le mécanisme de l'appareil Baudot est assez pénible à suivre, et que les schémas ne peuvent pas être commodément faits sur le tableau.

La chose est très importante, bien que l'appareil soit petit, parce que, si on maintient le bon synchronisme dans l'appareil Baudot-

---

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série, Tome IX, n° 97, septembre 1929, page 982.

(2) Bulletin de la Société Française des Electriciens, 4<sup>e</sup> Série, Tome IX, n° 97, septembre 1929, page 974.

Verdan, cela rend vraiment pratique l'emploi de l'appareil Baudot en radiotélégraphie et il est très important à ce point de vue là qu'une description complète de cet appareil figure dans le Bulletin de notre Société qui est lu à l'étranger, et où l'on peut se rendre compte que la maison Carpentier a fait là une œuvre importante.

Il faut associer le mérite de M. Verdan, inventeur, ingénieur des Postes et Télégraphes à ceux de la maison Carpentier qui, depuis de longues années, collabore avec lui pour la fabrication de l'appareil Baudot.

Dans la réalisation du synchronisme protégé il y a quelque chose qui me rappelle un peu ce qui existe dans les appareils récepteurs du Dispatching System ; cette pièce qui avance en trois fois, et qui à la troisième fois revient à son repos, si elle n'a reçu que deux signaux pendant les trois tours et qui, au contraire, donne la correction à la troisième fois si elle a bien reçu trois signaux. C'est un peu ce qui arrive sur les dispatchings des lignes de chemin de fer.

Il fallait certainement faire appel à un système mécanique autre que celui que donne la transmission télégraphique du Vaudot-Verdan ordinaire pour arriver à attraper cette correction fugitive qui ne se présente pas à un endroit fixe comme les signaux, et pas à tous les tours.

M. BONNIN. — Plusieurs variantes ont été réalisées.

Dans l'une, qui est basée sur le même principe exactement, au lieu de trois électros, il n'y en a que deux, mais il y a un relais Baudot à la place d'un électro.

---



## OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ <sup>(1)</sup>

---

### PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

**Exécution des enroulements des Machines triphasées**, par MAURICE LE CADRE. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (6<sup>e</sup>). Un volume broché 25×16 cm, 128 pages, 72 figures, 50 schémas, 1930. (Don de l'Editeur). Prix 31 francs.

### APPAREILLAGE --- CANALISATION

**Appareillage électrique, Haute tension, Théorie, Construction, Applications**, par CHARLES BRESSON. Edité par Dunod, à Paris, 92, rue Bonaparte. Un volume 25×16 cm, 460 pages, année 1930, broché. (Don de l'Editeur). Prix 108 francs.

### TRANSMISSIONS PAR ONDES

**Le système de Télégraphie Baudot et ses applications**, par P. MERCY. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (6<sup>e</sup>). Un volume broché 22×14 cm, 640 pages, année 1930. (Don de l'Editeur). Prix 56 francs.

**T. S. F. : La Télégraphie sans fil. La téléphonie sans fils, applications diverses**, par G.-E. PETIT et LÉON BOUTHILLON. Edité par Delagrave, 15, rue Soufflot, à Paris. Un volume de 25×17 cm, broché, 424 pages, année 1925. (Don de l'Editeur).

### RECHERCHES PHYSIQUES

**Comptage de l'Energie électrique en courants alternatifs**, par J. TARTINVILLE. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte, à Paris (6<sup>e</sup>). Un volume broché 25×16 cm, 154 pages, année 1930. (Don de l'Editeur).

**Réflexions sur la Mécanique ondulatoire**, par E. DE CAMAS. Editeur Albert Blanchard, 3 bis, place de la Sorbonne, Paris. Un ouvrage broché 22×14 cm, 98 pages, année 1929. (Don de l'Editeur). Prix 14 francs.

**Les méthodes géophysiques pour l'étude des couches superficielles du sol**, par CH. MAURIN. Edité par la Revue Pétrolifère, 19, rue Marignan, à Paris. Un fascicule broché 21×13 cm, de 29 pages, année 1929. (Don de l'Editeur). Prix 10 francs.

**Molecular Spectra and Molecular Structure de la Society Th. Faraday**. Un volume broché de 24×15 cm, 330 pages, septembre 1929. (Don de la Société Th. Faraday). Prix £ 0.15.6.

**Les méthodes nouvelles en analyse quantique**, par PACOTTE JEAN. Editeur Albert Blanchard, 3-3 bis, place de la Sorbonne, Paris. Un ouvrage broché 25×18cm, 134 pages, année 1929. (Don de l'Editeur). Prix 22 francs.

**La Structure de la Lumière**, par J.-J. THOMSON. Edité par Albert Blanchard, 3 et 3 bis, place de la Sorbonne, à Paris. Une brochure de 50 pages 25×17 cm, année 1929. (Don de l'Editeur). Prix 9 francs.

### DIVERS

**Etablissement des prix de revient**, par le Lieutenant-Colonel RMAILHO. Edité par la Confédération générale de la Production française, 6, rue de Messine, à Paris. Un ouvrage broché 23×14 cm, 107 pages, année 1928. (Don de l'Editeur). Prix 7,50 francs.

**Annuaire de 1930 de l'Académie des Sciences**, édité par Gauthier Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, Paris (6<sup>e</sup>). (Don des Editeurs).

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens, 14, avenue Pierre-Larousse, de 14 à 18 heures, tous les jours, sauf le dimanche.

## BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

### ECLAIRAGE ET CHAUFFAGE

**Principes et applications de l'Eclairage**, par Robert de VALBREUZE. — Conférences faites au Conservatoire National des Arts et Métiers. — Un volume 14×21 cm de 143 pages, 70 figures. — 1929. — Brochure n° 10 des publications de la Sté pour le perfectionnement de l'éclairage, 134, boulevard Haussmann, Paris 8°. (Don de l'auteur.)

Cette brochure fait partie des publications de propagande qu'édite la « Société pour le perfectionnement de l'éclairage ». Cette Société fondée seulement depuis quelques années — 1925 — a déjà accompli des prodiges dans la technique de l'éclairage électrique et des merveilles dans l'art de l'utiliser. L'auteur, qui en a été l'un des fondateurs et en est le savant animateur, a eu le rare talent de présenter d'une façon claire et précise, dans les magistrales conférences qu'il a faites au Conservatoire National des Arts et Métiers, tout ce qu'il est utile de savoir sur les principes et les applications de l'éclairage.

Ces conférences constituent dans leur ensemble un véritable « cours théorique et pratique d'éclairage électrique » mis à la portée du public et dans lequel l'Ingénieur, l'étudiant, et tous ceux qui utilisent l'éclairage électrique trouvent les plus utiles enseignements et apprennent à choisir judicieusement les appareils qui conviennent au but à atteindre. De nombreuses et magnifiques phototypies illustrent le texte.

Les chapitres de l'ouvrage ont pour titres : La lumière — le rayonnement — grandeurs, unités et mesures photométriques — sources lumineuses — la Vision — conditions fondamentales d'un bon éclairage. — Lampes électriques. — Différents systèmes d'éclairage. — Appareils d'éclairage. — Applications pratiques.

**Eclairage**. — Huiles, alcool, gaz, électricité. Photométrie, par L. GALINE, Ingénieur des Arts-et-Manufactures, et B. SAINT-PAUL, ingénieur en chef Directeur des travaux de la Ville de Rouen.

3<sup>e</sup> Edition 1929. — Ouvrage de la Bibliothèque de l'Ingénieur des Travaux Publics. Un volume 13×19,5 cm. 827 pages, 372 figures. Editeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (6°). (Don de l'Editeur.)

Cet ouvrage renseigne sur les procédés de production et d'utilisation de l'énergie électrique et du gaz d'éclairage et passe en revue pour chaque genre d'éclairage les appareils de production et d'utilisation, de tarification et de contrôle. Il fournit tous les renseignements numériques nécessaires pour l'établissement d'un projet de distribution y compris le calcul des canalisations et de tous les appareils ou ouvrages entrant dans la constitution d'un réseau d'éclairage public au gaz et des distributions urbaines d'électricité. Une instruction pratique pour la détermination du pouvoir calorifique du gaz (Méthode approuvée par le Préfet de la Seine, le 9 mai 1921) est donnée en annexe.

### APPAREILLAGE. — CANALISATIONS. — TRACTION.

**Electrification partielle du réseau de la Compagnie d'Orléans**, par H. PARODI, Ingénieur conseil de la C<sup>ie</sup> d'Orléans. Préface de M. Paul Dubois, Directeur honoraire de la C<sup>ie</sup> d'Orléans. Volume 22×31 cm de 298 pages et 215 figures avec 7 planches hors texte. — 1928. — Prix broché : 48 fr. Editeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (7°). (Don de l'éditeur.)

L'électrification du Réseau de la Compagnie d'Orléans, bien que partielle, est une des plus importantes qui aient été réalisées, non seulement en Europe, mais dans le Monde entier, au point de vue de l'ampleur des installations, de leur complexité et de la diversité des problèmes qui ont été résolus. M. Parodi, dont la com-

pétence en matière de traction électrique est aussi universelle qu'incontestée a su mettre en évidence, dans des notes d'une grande clarté, les principes généraux qui ont dominé la conception et la réalisation d'une œuvre dont il a été le principal artisan. Il y démontre notamment qu'un projet bien étudié permet de prévoir, très exactement, les résultats à attendre de l'électrification d'un ensemble de lignes données.

Dans des « considérations générales » l'Auteur indique dans quelles conditions se pose le problème général de l'électrification des voies ferrées, et il étudie particulièrement le cas de la ligne de Paris à Brive constituant la première étape de l'électrification du réseau d'Orléans; puis, passant à la « description des installations », il étudie la production de l'énergie électrique dans les usines d'Eguzon et de Coindre.

« La transmission de l'énergie » fait l'objet d'un chapitre dans lequel l'Auteur, après avoir étudié les conditions d'établissement des lignes de transport de force, donne les caractéristiques des lignes à 90 kv et de la ligne à 150-220 kv d'Eguzon à Paris et des sous-stations de transformation.

Le chapitre relatif à la « distribution de l'énergie » contient tout ce qui est relatif au calcul et à l'installation des lignes de contact — troisième rail et lignes aériennes avec leurs supports et leurs équipements spéciaux.

Enfin, « l'utilisation de l'énergie » dans les locomotives des divers types employés pour la traction des trains de voyageurs et des trains de marchandises, est minutieusement étudié dans le dernier chapitre de l'ouvrage.

#### TÉLÉGRAPHE. — TÉLÉPHONE. — TRANSMISSION PAR ONDES.

**Telegraphy and Telephony, including wireless, an introductory textbook to the science and art of the electrical communication of intelligence by E. Mallett.** — D. Sc. Eng. London, 1929. Un volume 15 x 22 cm de 413 pages, 287 figures. Prix relié toile : 21 sh. net.

Editeurs : Chapman et Hall, 11, Henrietta Street, W. C. 2 London. (Don des Editeurs.)

Cet ouvrage qui se destine aux élèves de l'Université et des Instituts techniques anglais ainsi qu'aux étudiants possédant les principes d'électricité et du magnétisme comprend trois parties et des annexes.

La première partie est consacrée aux Lignes télégraphiques, la seconde aux lignes téléphoniques, la troisième à la télégraphie et à la téléphonie sans fil. Les annexes contiennent les formules chronométriques et les quelques notions de mathématiques supérieures utilisées dans le cours de l'ouvrage.

Les chapitres de chacune des parties se rapportent à l'étude des appareils employés et des phénomènes qui accompagnent leur fonctionnement, à la théorie des transmissions proprement dites et de la réception.

Editeur : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 15, rue des Saints-Pères, Paris, et 1, quai de la Grande-Bretagne, Liège (Belgique). (Don de l'éditeur.)

# IL Y A TRENTE ANS

---

Réunion ordinaire mensuelle du 7 mars 1900

Présidence de M. J. VIOLLE

M. ZETTER fait une communication sur l'appareillage pour circuits de haute tension : coupe-circuits bipolaires, interrupteurs, supports, raccords isolateurs pour 220 volts ; il décrit un interrupteur automatique à coupe-circuit étudié spécialement pour les ascenseurs électriques.

M. X. GOSSELIN présente une communication sur le Tramway électrique du Bois de Boulogne à traction mixte par trolley et contacts superficiels système Vedovelli. Le schéma du système Vedovelli et le fonctionnement des plots sont expliqués en détail ; un dispositif de sécurité, consistant en une chaîne pendante, empêche qu'un plot ne puisse être découvert par le véhicule lorsqu'il est encore excité.

# BULLETIN

DE LA

# SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

# ÉLECTRICIENS

---

## SOMMAIRE

---

### COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du Samedi 1<sup>er</sup> Février 1930, p. 338.

Admissions des Membres titulaires, p. 338.

Nécrologie : Rateau, p. 339, Général Sebert, p. 340.

### COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Compte rendu des discussions de la semaine d'Octobre 1929 (fin)

6<sup>e</sup> SECTION. — Sommaire, p. 342. — Sur la puissance réactive (MM. BOUCHEROT, BRYLINSKY, LIÉNARD et JUPPONT), p. 343. — Sur la définition des capacités (M. DELLA RICCIA), p. 365. — Vues modernes sur l'électrostatique (MM. BOUCHEROT, CHAUMAT et DARRIEUS), p. 367. — Dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de Boucherot (MM. BOUCHEROT et DARRIEUS), p. 369. — Projet de clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs de réseaux (MM. LÉBAUPIN, CAYE et CHEVALIER), p. 374. — Sur l'universalité nécessaire du système métrique absolu (MM. DARRIEUS et BAYLE), p. 377.

### INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

a) Nomination de M. Paul JANET, Président d'Honneur, p. 380.

b) Cinquantenaire de l'Electrotechnischer Verein, p. 381.

c) Congrès de Tokio, p. 382.

### TRAVAUX DES SECTIONS

Sommaire, p. 384. Texte, p. 384.

### OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 460.

### BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 461.

### IL Y A TRENTE ANS, p. 464.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4<sup>e</sup> série, tome X, n° 104.

# COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

## RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 1<sup>er</sup> Février 1930

Présidence de M. PARODI

La séance est ouverte à 20 h. 45.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

- Arpin** (Camille), ingénieur E. S. E., ingénieur à la Société « La Porcelainerie de Lesquin », 173, boulevard Haussmann, à Paris (8<sup>e</sup>). Domicile : 26, rue Durantin, à Paris (18<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Lange et Jouvion.
- Assaad** (Riad), 2, rue du Séjour, à Charenton (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Barsu** (Pierre), Ingénieur à la Société d'Electricité de la Vallée du Rhône, 38 rue Raulin, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et Barsu.
- Bastien** (Michel-Henri-Louis) ingénieur E. T. P., 116, rue de Vaugirard, à Paris (6<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Bernheim-Dennery** (Mlle Antoinette), 95, avenue du Roule, à Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présentée par MM. Janet et Guilbert.
- Chalumeau** (Camille-René), ingénieur en chef de la Ville de Lyon, 16, rue Hôtel-de-Ville, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Berne et Dumont.
- Charpentier** (Paul-Jacques-Marie), ingénieur en chef de la Société Alsthom, 146, avenue des Champs-Élysées, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Imbs et Roth.
- Eleftheriou** (Ermogène), 4, place de la Gare, à Grenoble (Isère). — Présenté par MM. Grosselin et Lorin.
- Ferrier** (Henri-Edouard-Marcel), secrétaire du Comité de l'Union des Syndicats de l'Electricité, 27, rue Delambre, à Paris (14<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Cahen et Ulrich.
- Gaignebet** (Emile-Antoine), Cité Belge, 5, boulevard Jourdan, à Paris (14<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Hauriot** (Raymond), 35, rue Edgar-Quinet, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Ilinsky** (Alexandre), 2, rue de Casablanca, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Lefèvre** (Robert-Charles), ingénieur chef de service à la Compagnie Electro-Mécanique, 31, avenue Kléber, Le Vésinet (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Isler et Darrieus.
- Levy** (Moïse), 5, rue Etienne-Marcel, à Paris (2<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Libert** (René-Paul-Louis), 45, avenue Auguste-Dumont, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Mainfroy** (Etienne), 80, boulevard de Courcelles, à Paris (17<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Meunier** (Lucien-Henri), 2, rue Béranger, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

- Noûe** (Armand de), 27, avenue Bosquet, à Paris (7<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Ulrich et Martin.
- Oehlschlager** (H.), ingénieur à la Compagnie générale de T. S. F., Boîte postale 238, à Saïgon (Cochinchine). — Présenté par MM. Bethcnod et Bougué.
- Quernel** (Guillaume-Jean-Marie), ingénieur I. E. T. 12, Villa d'Orléans, à Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Janet et Drouin.
- Quiñones Gomez** (Virgilio-Romiro), Profesor de la Universidad de la Habana, Basarrate 15 (altos), à Habana (Cuba). — Présenté par MM. Janet et de Bernard.
- Roman Mayor Jr**, Profesor de Electricidad Aplicada-Universidad de la Habana, Apartado 1689, à Habana (Cuba). — Présenté par MM. Janet et de Bernard.
- Schwarberg** (Henri-Eugène-Gustave), ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique, 30, rue des Dames, à Paris (17<sup>e</sup>). — Présenté par MM. E. Schwarberg et Widmer.
- Tetrel** (Alfred-Frédéric), ingénieur des services électriques de la Compagnie d'Orléans, 58, boulevard Saint-Marcel, à Paris (5<sup>e</sup>). Présenté par MM. Barillot et Cardon.
- Thal** (Salomon), 146, rue de Bagneux, à Montrouge (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Tourneur** (Charles-Louis-Emile), ingénieur adjoint au service central du Matériel des Chemins de fer du P.-L.-M., 20, boulevard Diderot; domicile, 1, rue des Ecoles, à Charenton (Seine). — Présenté par MM. Japiot et Bergeret.
- Vedrinne** (Henri-Alexandre), ingénieur à la Compagnie du Bourbonnais, MM. P. de Lachomette, Villiers et Cie, 4, quai de la Pêcherie, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Lachomette et Gaillard.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. le Président fait part en ces termes du décès de M. RATEAU et du général SEBERT.

Auguste RATEAU, dont je salue ici respectueusement la mémoire est né le 13 octobre 1863 à Royan et mort à Paris en janvier 1930. Il fut un merveilleux remueur d'idées et un créateur génial en même temps qu'un grand industriel.

Né à Royan (Charente-Inférieure) en 1863, Rateau est entré à l'âge de 18 ans à l'Ecole Polytechnique dont il sortit premier en 1883.

Ingénieur au corps des mines, il professa pendant dix ans le cours de mécanique et d'électricité industrielle à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne. Nommé à l'Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris il y professa de 1902 à 1910 l'Electricité Industrielle et y créa le Laboratoire d'Electricité. A partir de 1910, Rateau se consacre entièrement à l'industrie où il marqua sa trace, non seulement en créant de très importantes Usines, mais encore et surtout en mettant au point une série de découvertes dont l'industrie toute entière a bénéficié.

Ses premières recherches sur les cellules Belleville furent déjà très remarquées, mais ce sont surtout des grandes études consacrées aux

turbo-machines et aux ventilateurs qui lui ont acquis sa grande renommée mondiale.

Son traité des turbo-machines, ses mémoires relatifs aux trompes, à la théorie des hélices propulsives, aux anémomètres et au tube de Pitot, aux éjecto-condenseurs, à l'écoulement de la vapeur d'eau, aux freins hydrauliques, à l'équivalent mécanique de la calorie, sa découverte de la suralimentation des moteurs à explosion et ses travaux si riches de conséquences en aéro-dynamique lui assurent une place d'élection parmi les grands savants dont s'honore la science française.

Pendant la guerre, Rateau fut appelé à s'occuper des freins de bouche des canons et il mit au point à la fois la théorie très délicate de ces appareils en même temps que leur construction pratique tout en dirigeant l'usine modèle qu'il avait créée de toutes pièces pour la fabrication des munitions de guerre.

Je n'énumérerai pas les titres et les distinctions attribuées à Rateau, membre de l'Institut depuis 1918 : sa véritable grandeur était en lui-même et tous ceux qui, comme moi ont eu le bonheur de l'approcher se rappellent avec admiration en même temps que son encyclopédique intelligence, son extrême bonté, sa simplicité spontanée, son ardent amour de la vérité et son effort infatigable vers le progrès.

J'adresse à sa famille, à sa femme, à ses enfants, à ses collaborateurs, l'hommage de la Société française des Electriciens en même temps que mon souvenir ému et respectueux.

Le général SEBERT qui fut de notre Société en 1889 était depuis 1897 membre de l'Institut où il avait été élu en remplacement de Résal.

Les travaux du général Sebert se rapportent presque tous à l'artillerie et à la théorie des explosifs et aussi à l'esperanto dont il était un ferme partisan.

Ses recherches en balistique pratique, notamment celles relatives au développement des pressions dans les freins et les canons, à la mesure des vitesses de détonation, à la pénétration des projectiles sont particulièrement estimées.

Esprit curieux et inventif, il s'intéressait aux questions de physique générale et de mécanique et il a laissé des travaux fort intéressants sur la transmission des vibrations. Appelé à de hautes fonctions civiles, après avoir achevé une carrière militaire bien remplie, le général



Sebert a su attirer toutes les sympathies de ses collègues et de ses collaborateurs. Nous adressons à la famille de notre ancien Président les condoléances de la Société française des Electriciens.

M. PARODI passe la présidence à M. le général FERRIÉ et présente sa communication sur « *Le développement de l'électricité et l'évolution des conceptions scientifiques* » <sup>(1)</sup>.

M. le général Ferrié remercie M. Parodi de son exposé si clair et si substantiel, et lui rend la Présidence.

M. Parodi remet ensuite à M. Dauvillier, titulaire du legs Cheux pour 1929, et à MM. Chauveau et Mesny, titulaires du legs Ancel pour 1929, une médaille en bronze à l'effigie de Ch. Mascart, en même temps que le montant du prix qui leur a été alloué pour récompenser les travaux ci-après :

M. DAUVILLIER. — « *La production, l'utilisation radiologique et le dosage de rayons X de grande longueur d'onde (jusqu'à 8 unités Angström)* ».

M. CHAUEAU. — « *le sférographe* ».

M. MESNY. — « *la téléphotographie d'amateur* ».

L'ordre du jour appelle une discussion de la communication de M. Roy sur « *les redresseurs à vapeur de mercure* ».

MM. LEBAPIN, DARRIEUS et GIROZ prennent part à cette discussion et M. Roy répond aux observations qui lui sont présentées <sup>(2)</sup>.

M. NADILLON présente « *Un nouveau dispositif de mesure en courant alternatif musical : le Potentiomètre-phasemètre. — Applications à la phonométrie* ».

M. le Président remercie M. Nandillon de son intéressant exposé.

La séance est levée à 18 h. 45.

---

(1) Cette communication paraîtra in-extenso dans un bulletin ultérieur.

(2) Le texte de la discussion paraîtra dans un bulletin ultérieur en même temps que la communication de M. Roy.

# SEMAINE DE DISCUSSION D'OCTOBRE 1929

COMPTE RENDU STÉNOGRAPHIQUE DES DISCUSSIONS

(fn)

Séance du Samedi 26 Octobre 1926

## 6° SECTION. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE. — APPAREILS DE MESURE

### SOMMAIRE

- 1° Discussion des observations de M. BOUCHEROT sur la puissance réactive. — MM. BOUCHEROT, BRYLINSKI, LIÉNARD, JUPPONT, p. 343.
- 2° Discussion du rapport de M. LIOVICI « sur la définition des capacités ». — M. DELLA RICCIA, p. 365.
- 3° Discussion du rapport de M. CHAUMAT: « Vues modernes sur l'électrostatique ». — M. BOUCHEROT: machines électrostatiques dans un vide très poussé. — M. CHAUMAT: machines de faible puissance et de tensions très élevées. — M. DARRIEUS: conditions de commutation. — M. CHAUMAT: rendement organique d'une machine électrostatique avec excitatrice, p. 367.
- 4° Discussion du rapport de M. BUNET sur les dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de M. Boucherot. — M. BOUCHEROT: Montage résonant en pyramide triangulaire; son utilisation comme filtre T.S.F. — M. DARRIEUS: remarques sur les figurations des courants alternatifs par des vecteurs, p. 369.
- 5° Discussion du rapport de M. DE LA GORCE sur un projet de clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs de réseaux. — M. LEBAPIN: valeur à donner à la tension d'essai. — M. CAYE: tension de perforation, mesure des pertes, surcharges. — M. CHEVALIER: prix de revient, 374.
- 6° Discussion du rapport de M. BAYLE sur l'universalité nécessaire du système métrique absolu. — M. DARRIEUS: poids en un point de la terre où l'accélération de la pesanteur égale 10. — M. BAYLE: adoption de l'accélération 9,80; uniformité du kilogramme force, p. 377.

Présidence de M. LIÉNARD,

*Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines*

M. BOUCHEROT présente les observations suivantes *sur la puissance réactive*.

Je suis venu à quelques réunions de la semaine d'octobre 1928, ainsi qu'en témoignent les comptes rendus, mais je n'ai pu venir à celles où l'on a discuté de la puissance réactive. Quelques échos m'en

sont venus, mais j'ai attendu que le Bulletin nous en donne la teneur pour intervenir.

Je désire seulement donner mon avis sur la proposition faite de donner un nom à l'unité de puissance réactive. Plusieurs personnes ont insisté sur ce point, M. Brylinski, entre autres, a dit, page 280 :

« ...Or, le principe est simple, c'est celui qu'a rappelé M. Ailleret. Nous produisons de l'énergie réactive, nous la livrons, nous devons la faire payer. Or, pour vendre une marchandise, il faut qu'elle ait un nom et une unité de mesure définie. »

Il n'y a à ce raisonnement que deux défauts : le distributeur en réalité, ne livre rien, et ce que M. Brylinski appelle l'énergie réactive n'est pas une marchandise.

La Commission électrotechnique internationale, organisme qualifié, a défini la « Puissance réactive :  $U I \sin \varphi$  et, comme on l'a déjà dit, cette expression n'est peut-être pas très heureuse. Elle n'a jamais défini ce que M. Brylinski et d'autres personnes appellent improprement l'énergie réactive :  $\int U I \sin \varphi dt$ . S'il avait été question de définir cette grandeur avec ce nom, je m'y serais opposé de toutes mes forces, car cette intégrale *n'est pas de l'énergie* : c'est une simple fiction mathématique ; elle est homogène à une énergie, mais ce n'est pas de l'énergie, pas plus que le couple en mécanique ordinaire, également homogène à une énergie. La chose est d'importance parce que *légalement*, l'énergie est une marchandise.  $\int U I \sin \varphi dt$  ne peut pas être une marchandise.

Dire au client qu'on lui livre de l'énergie, c'est plus qu'une inexactitude. Dans le cas d'un client branché sur un courant alternatif simple, on peut dire qu'on lui livre de l'énergie pendant une fraction de la demi-période, mais il la rend pendant la fraction suivante, il la restitue moins d'un centième de seconde après ; donc il ne doit rien. Dans le cas plus général d'un client branché sur courants polyphasés, c'est mieux encore, l'échange d'énergie se fait exclusivement chez le client, entre ses phases. Il n'y a même plus à dire qu'on lui livre quoi que ce soit, en régime établi : la puissance instantanée totale est égale à la puissance réelle : elle est constante.

Si l'on veut faire admettre au client qu'il doit payer quelque chose pour l'intégrale  $\int U I \sin \varphi dt$ , *ce qui est parfaitement légitime*, ainsi que je l'ai montré amplement en 1917 (Bulletin de la Société de Dé-

cembre 1917), point n'est besoin pour cela de le traiter comme un enfant.

S'il est absolument besoin, pour cela, d'une assimilation commerciale, il en est une, plus conforme à la réalité, que l'on peut trouver ; c'est l'assimilation de l'intégrale en question à une location ou une indemnisation pour « enveloppe de l'énergie », ce qu'on appelle communément « l'emballage ».

Souvent l'emballage est sans valeur, et le commerçant le fournit gratuitement en sus. Mais dans d'autres cas l'emballage vaut plus que la marchandise. Pour livrer de l'oxygène comprimé, par exemple, ou de l'acide carbonique, le fournisseur doit le mettre dans une bouteille en acier qui coûte plus cher que le contenu. Il fait payer une location pour cette bouteille, proportionnelle au temps, et qui varie avec la quantité d'oxygène livré, avec sa pression... Si le client dispose d'un emballage à lui, il n'a rien à payer en plus du transport de l'oxygène *et de la bouteille*, tout comme le client qui ramène son cos  $\varphi$  à l'unité par un artifice quelconque.

Mais ne peut-on pas dire tout simplement, comme je l'ai fait depuis longtemps, qu'il faut faire payer à l'abonné une somme proportionnelle à l'intégrale de la puissance réactive, non pas parce qu'on lui livre autre chose que de l'énergie, mais parce que, pour livrer de l'énergie quand la puissance réelle est accompagnée de puissance réactive, il y a à faire des dépenses d'intérêt et d'amortissement pour immobilisation de capitaux supplémentaires, d'une part, et, d'autre part, des dépenses supplémentaires d'énergie, toutes dépenses qui sont proportionnelles à l'intégrale de la puissance réactive.

Je ne vois pas qu'il faille pour cela donner un nom à l'unité de puissance réactive. Comme l'a fait remarquer M. Budeanu, c'est beaucoup plus à la grandeur qu'à l'unité qu'il convient de donner un nom : la résistance, la réactance, l'impédance s'expriment toutes en ohms et cela ne va pas plus mal, au contraire ; l'énergie, le couple s'expriment souvent en kilogrammètres ou en joules. Il y a longtemps que je parle de puissance réactive : j'ai commencé avant 1900 ; je l'exprime toujours en watts réactifs, maintenant, et cela ne me gêne pas. Pour l'enregistrement du compteur sinus on pourrait parler en unités quelconques, *sans* faire d'ailleurs intervenir le préfixe *kilo*, ni le suffixe *heure*. Donner un nom d'unité qui rappelle l'énergie, c'est fausser les idées.

Cette opinion me met à l'aise pour dire à M. Brylinski, au sujet d'une autre remarque qu'il a faite page 289, qu'à ma connaissance, aucun organisme qualifié n'a émis de règle, encore moins de règle absolue, au sujet de la formation des noms d'unités. Qu'il y ait un accord tacite pour faire ainsi qu'il l'a dit, je veux bien, mais il y en a encore un qu'il a passé sous silence, c'est que le nom de l'unité doit rappeler celui du savant ayant produit des travaux se *rattachant* à l'unité qu'on se propose de dénommer.

M. BRYLINSKI présente les observations suivantes :

M. Boucherot proteste contre l'emploi, pour l'intégrale  $\int (U I \sin \varphi) dt$  de l'expression « énergie réactive » et en vient même à regretter la dénomination de « puissance réactive » pour la quantité  $U I \sin \varphi$ .

Cette attitude, nouvelle de sa part en ce qui concerne la « puissance réactive » dont il a été l'un des parrains, doit-elle entraîner la modification de la manière de voir actuellement admise d'une manière très générale ? Je ne le pense pas, pour les raisons développées plus loin, qui ont pour base les considérations suivantes : j'estime que la puissance réactive est de la nature d'une puissance, et d'autre part, la puissance étant, par définition, la dérivée de l'énergie par rapport au temps, l'énergie est l'intégrale de la puissance dans le temps, de sorte que l'intégrale de la « puissance réactive » dans le temps doit normalement s'appeler « énergie réactive ».

Examinons la question de plus près, en la limitant au cas des tensions et courants sinusoïdaux.

Dans une *portion de circuit* où la tension est

$$U_m \sin \omega t$$

le courant a pour expression

$$I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

où  $\varphi$  n'est nul qu'exceptionnellement et peut être négatif.

Or on peut écrire

$$I_m \sin(\omega t - \varphi) = (I_m \cos \varphi) \sin \omega t + (I_m \sin \varphi) \sin \omega \left( t - \frac{T}{4} \right)$$

ce qui montre que le courant est, à chaque instant, la somme d'un courant sinusoïdal d'amplitude  $I_m \cos \varphi$  en phase avec la tension et d'un autre courant sinusoïdal d'amplitude  $I_m \sin \varphi$  en retard d'un quart de période (pour  $\varphi > 0$ ) sur la tension. L'intervention des facteurs  $\cos \varphi$

et  $\sin \varphi$  a pour effet de modifier l'amplitude de ces deux courants, mais ne saurait avoir pour effet de leur enlever le caractère de courants ; les valeurs  $I_m \cos \varphi$  et  $I_m \sin \varphi$  de ces deux courants sont bien des amplitudes de courant et il en est de même des valeurs efficaces  $I \cos \varphi$  et  $I \sin \varphi$ , qui sont des valeurs efficaces de courants.

Ce résultat, depuis longtemps connu, est matérialisé dans la représentation vectorielle classique, où le courant est décomposé en deux vecteurs :  $I \cos \varphi$  coïncidant avec la tension en direction et  $I \sin \varphi$  en quadrature, dont il est la résultante. Or on ne peut composer ensemble que des vecteurs de même nature, par conséquent  $I \cos \varphi$  et  $I \sin \varphi$  sont des courants comme leur résultante. Cette décomposition vectorielle n'est pas purement mathématique, car la valeur efficace du courant résulte de l'équation

$$\begin{aligned} I_{\text{eff.}}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [2I^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \omega t + 2I^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \omega t - I^2 \sin \varphi \cos \varphi \sin 2\omega t] dt \\ &= I_a^2 + I_r^2 \end{aligned}$$

qui montre que le courant efficace est l'hypoténuse du triangle rectangle dont les côtés sont  $I_a$  et  $I_r$ .

Si dès lors, nous multiplions ces trois courants par une même grandeur, la tension efficace  $U$ , nous obtenons nécessairement trois produits de même nature,  $U I$ ,  $U I \cos \varphi$  et  $U I \sin \varphi$ . On connaît la nature de l'un de ces produits,  $U I \cos \varphi$  qui est la puissance réelle ou active ; donc ces trois produits sont de la nature d'une puissance et l'on est fondé à appeler  $U I \sin \varphi$  « puissance réactive » comme dérivant du courant réactif  $I \sin \varphi$  et  $U I$  « puissance apparente », ces adjectifs différents ayant précisément pour but de marquer que ces trois éléments, bien que de la nature d'une puissance, ne jouissent pas exactement des mêmes propriétés.

On peut encore remarquer que dans toute installation et à tout instant la puissance réactive  $P_r$  et la puissance active  $P_a$  sont liées l'une à l'autre par la relation  $P_r = P_a \operatorname{tg} \varphi$ , c'est-à-dire par un simple coefficient numérique ce qui montre bien qu'elles sont de même espèce.

Il en est de même de l'énergie réactive, intégrale de la puissance réactive dans le temps. Le groupe de mots « énergie réactive » forme un bloc qui distingue nettement l'élément ainsi envisagé de l'éner-

gie sans épithète et dont le but est précisément de montrer que ces deux éléments ne jouissent pas exactement des mêmes propriétés.

On peut aller plus loin. La puissance instantanée de la portion de circuit envisagée est

$$\begin{aligned} ui &= 2UI \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) \\ &= (UI \cos \varphi) (1 - \cos 2\omega t) - (UI \sin \varphi) \sin 2\omega t. \end{aligned}$$

Le premier terme, dont la valeur moyenne est  $\bar{U} I \cos \varphi$  pour un nombre entier de périodes, représente la puissance active, dont une partie est transformée en chaleur, en lumière, en puissance mécanique, etc... Le second, qui représente une puissance oscillante, exprime la puissance instantanée du courant réactif ; son amplitude est précisément égale à la puissance réactive  $U I \sin \varphi$ .

On passe à l'énergie en multipliant par  $dt$  et intégrant.

L'intégrale pendant une demi-période de cette énergie (donc  $\frac{T}{4}$  puisque cette énergie a une fréquence double de celle de la tension ou du courant) a pour valeur

$$\frac{2(UI \sin \varphi)T}{4\pi} = \frac{2}{\pi} (UI \sin \varphi) \frac{T}{4}.$$

Ce qui est précisément, à un coefficient purement numérique près, l'énergie réactive pendant un temps égal à un quart de période.

Pendant les demi-périodes suivantes, cette énergie reprend successivement les mêmes valeurs alternativement avec le signe — et avec le signe +, de sorte que la valeur nulle de cette énergie oscillante au bout d'un nombre entier de périodes résulte seulement de la succession régulière de quantités d'énergie réactive égales et de signes contraires ; mais l'amplitude de cette énergie, qui a précisément pour valeur  $(U I \sin \varphi) dt$  n'est pas nulle.

Se basant sur ce caractère oscillant de l'énergie instantanée du courant réactif, M. Boucherot nous a dit que le distributeur ne livre pas d'énergie réactive à ses clients, et que, par conséquent, ses clients ne lui doivent rien.

C'est ici qu'il faut faire bien attention de ne pas se payer de mots. On aurait pu, sans doute, adopter au début d'autres expressions pour désigner ce que nous appelons « puissance réactive » et « énergie réactive » et obtenir néanmoins pour le distributeur une indemnisation de certains frais, que M. Boucherot reconnaît justifiée. Mais actuellement tout ce système d'indemnisations est basé sur ces expres-

sions, dont la modification entraînerait des troubles graves ; on ne pourrait donc songer à une pareille modification que si elle était réellement nécessaire, et c'est ce que M. Boucherot ne démontre pas.

Pour nous rendre compte de la valeur du raisonnement proposé, appliquons-le à un autre cas analogue, par exemple au courant absorbé par un abonné de lumière. Le distributeur livre à l'abonné du courant alternatif que ce dernier fait passer dans des filaments de lampes de résistance convenable afin d'obtenir de la lumière moyennant une certaine consommation d'énergie active. Mais ce courant est alternatif, de sorte que, si le distributeur livre de l'électricité à

l'abonné pendant une demi-période, en quantité égale à  $\frac{IT\sqrt{2}}{\pi}$ , l'abonné restitue cette même quantité pendant la demi-période suivante ; donc il ne doit rien, si l'on accepte le raisonnement proposé, bien qu'il ait utilisé de la lumière produite par ce courant.

Je n'ignore pas que la production de lumière tient à ce que l'énergie employée à obtenir ce résultat est proportionnelle au carré du courant, et je me garderai bien de pousser le raisonnement trop loin. Il n'en subsiste pas moins que, si l'on appliquait brutalement au courant le raisonnement que M. Boucherot emploie pour l'énergie réactive, il résulterait de ce raisonnement que le distributeur ne livre pas de courant à son abonné et que ce dernier ne lui doit rien.

Les conséquences inacceptables auxquelles on arriverait ainsi montrent que le raisonnement proposé n'est pas valable et qu'il faut approfondir un peu plus la question.

Or, la situation est la suivante : Un abonné quelconque d'un réseau à courant alternatif a besoin, pour pouvoir utiliser la puissance active  $P_a$  mise à sa disposition, qu'il soit maintenu simultanément un régime déterminé de puissance réactive  $P_r$  de caractère alternatif, par conséquent nulle en moyenne, mais d'amplitude généralement non nulle (si l'on tient compte pour les abonnés d'éclairage de la nécessité de transformateurs abaisseurs de tension), ou, ce qui revient au même, qu'il soit maintenu un certain déphasage du courant qu'il emploie sur la tension.

L'abonné pourrait produire lui-même cette puissance réactive ; mais le plus souvent il préfère s'en dispenser et alors c'est l'usine génératrice qui est obligée, sans pouvoir s'y soustraire, de produire cette puissance réactive, ou, si l'on préfère, ce courant réactif, et le



distributeur qui est obligé de le transporter sur son réseau. Il résulte, en effet, d'une des lois de Kirchhoff que le courant au départ de l'usine est égal à chaque instant à la somme des courants employés dans les appareils nécessaires du réseau (tels que les transformateurs par exemple), des courants utilisés par les abonnés et des courants passant par les défauts d'isolement, en supposant les amplitudes des courants ramenées à ce qu'elles seraient si les transformateurs étaient à rapport unité, soit

$$I_m \sin(\omega t - \varphi) = \Sigma I'_m \sin(\omega t - \varphi')$$

ce qui exige que

$$I_m \cos \varphi = \Sigma I'_m \cos \varphi'$$

$$I_m \sin \varphi = \Sigma I'_m \sin \varphi'.$$

Ces relations, depuis longtemps classiques, font bien ressortir que le courant réactif nécessaire à l'abonné, si nul qu'il soit en moyenne, doit être produit par l'usine génératrice et transporté par le réseau. Or, ni ce transport, ni cette production ne sont gratuits.

La question des frais qu'entraîne cette sujétion pour l'usine génératrice, d'une part, et pour le distributeur, d'autre part, a été étudiée par divers techniciens et notamment par M. Boucherot. Je n'y reviendrai donc pas, et me bornerai à rappeler que, dans les conditions habituelles des distributions, le total de ces frais est à chaque instant suffisamment voisin de la proportionnalité à la puissance réactive  $U I \sin \varphi$  pour qu'on puisse, en pratique, adopter pour leur remboursement au distributeur pendant un temps déterminé un tarif proportionnel à  $\int (UI \sin \varphi) dt$  c'est-à-dire, comme nous l'avons vu précédemment, proportionnel à l'énergie réactive oscillante des abonnés par demi-période.

Tout ceci se rapporte à un conducteur parcouru par un courant alternatif tel que, par exemple, un conducteur de circuit polyphasé en regard de son conducteur neutre (existant ou fictif), ou tel que serait, au moins approximativement, un conducteur de distribution en série faisant une large boucle, le conducteur étant ainsi, à tout endroit, éloigné de tout autre conducteur du même système et pouvant dès lors être qualifié de monophasé.

Les circuits dits dans le langage usuel à courant alternatif simple comportent, au contraire, deux conducteurs voisins, dans lesquels les courants ont même amplitude, mais des phases différant de  $\pi$ . Ces cir-

cuits, qu'on devrait appeler diphasés si l'on n'avait réservé ce nom aux systèmes qui sont en réalité tétraphasés, sont, du point de vue auquel nous nous plaçons, de véritables circuits polyphasés.

$\sin \varphi$  pour qu'on puisse, en pratique, adopter pour leur remboursement du circuit égale en un point à  $(UI \sin \varphi) \sin 2\omega t$ , elle aura pour valeur au même endroit, dans l'autre conducteur,

$$(- UI \sin \varphi) \sin 2\omega t$$

de sorte que la somme algébrique de ces puissances réactives oscillantes est nulle à tout instant.

De même, si nous envisageons la phase  $(p+1)$  d'un système  $n$ -phasé, la puissance réactive oscillante  $y$  a pour valeur

$$(UI \sin \varphi) \sin 2 \left( \omega t - \frac{2p\pi}{n} \right)$$

et si l'on fait la somme algébrique de ces puissances pour toutes les phases en un même endroit, on trouve

$$(UI \sin \varphi) \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin \left( 2\omega t - \frac{4p\pi}{n} \right) = 0$$

M. Boucherot s'empare du résultat nul de cette opération mathématique et nous tient à peu près ce langage : « c'est mieux encore, l'échange d'énergie se fait exclusivement chez le client, entre ses phases, il n'y a même plus à dire qu'on lui livre quoique ce soit, en régime établi ».

Ce raisonnement vaut-il mieux que le précédent, relatif au courant monophasé ? Il est aisé de voir qu'il n'en est rien.

Appliquons-le tout d'abord au courant, comme plus haut. De même que la somme algébrique des énergies réactives oscillantes des diverses phases en un point du circuit, la somme algébrique des courants des diverses phases est constamment nulle en n'importe quel point du circuit.

Si donc on appliquait le raisonnement à un abonné quelconque on devrait dire qu'on lui fournit un courant constamment nul, c'est-à-dire pas de courant. De même l'usine génératrice produirait un courant constamment nul, et le réseau ne transporterait qu'un courant constamment nul. Quelle singulière situation ce serait !

Il est évident que le raisonnement ne vaut pas : ce défaut de solidité tient sans doute à ce qu'il est basé sur une opération mathéma-

tique dont le résultat est, bien entendu, exact, mais qui n'est pas en rapports directs avec la situation envisagée. Dans la réalité, le distributeur est obligé de produire et de transporter *sur chacune des phases* l'énergie réactive utilisée par les clients sur cette phase, dans les mêmes conditions que pour le courant monophasé, et aucune compensation ne résulte pour lui du fait que la somme algébrique de ces différentes énergies réactives oscillantes est nulle en tout point.

Je me bornerai à en donner un seul exemple. L'énergie transformée en chaleur par effet Joule dans une portion de conducteur pendant un période a pour valeur

$$RI^2T = RI^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi)T = \frac{R}{U^2T}(W_a^2 + W_r^2).$$

Cette expression subsiste sans modification pour chacune des phases d'un circuit polyphasé, de sorte que, dans un circuit  $n$ -phasé, cette expression devient

$$\frac{nR}{U^2T}(W_a^2 + W_r^2).$$

Ainsi l'énergie réactive oscillante, qui est nulle en tout point d'un circuit polyphasé et à tout instant, entraîne néanmoins une perte Joule proportionnelle au carré de son amplitude et au nombre de phases du circuit.

Il est aisé, d'ailleurs, de se rendre compte que la décomposition qui précède n'est pas un pur jeu mathématique. La perte Joule est proportionnelle à  $I^2$ ; or, à puissance active constante,  $I$  est d'autant plus grand que  $\cos \varphi$  est plus petit, c'est-à-dire d'autant plus grand que le déphasage (ou la puissance réactive) est plus grand. Précisons davantage : pour un courant sans déphasage, le courant  $I_1$  correspondant à une puissance active  $P_a$  sera égal à

$$I_1 = \frac{P_a}{U}.$$

Pour un déphasage  $\varphi$  du courant sur la tension, le courant deviendra

$$I_2 = \frac{P_a}{U \cos \varphi}.$$

Les puissances perdues par effet Joule seront respectivement

$$RI_1^2 = R \frac{P_a^2}{U^2}$$

$$RI_2^2 = R \frac{P_a^2}{U^2 \cos^2 \varphi}.$$

L'excès de la seconde perte Joule sur la première aura pour valeur

$$\frac{RP_a^2}{U^2} \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1 \right) = \frac{RP_a^2}{U^2} \operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{RP_r^2}{U^2}$$

puisqu'on a à tout instant, par définition,

$$P_r = P_a \operatorname{tg} \varphi.$$

Cela montre bien que le déphasage introduit une perte Joule supplémentaire qui est, en puissance, proportionnelle au carré de la puissance réactive et, par conséquent, en énergie, proportionnelle au carré de l'énergie réactive.

M. Boucherot ajoute qu'il est parfaitement légitime que le client paie quelque chose pour l'intégrale  $\int (UI \sin \varphi) dt$ , et qu'il serait d'accord si l'on assimilait ce que représente cette intégrale à l'emballage de la marchandise.

Il faut remarquer tout d'abord que l'emballage d'une marchandise est lui-même une marchandise ; et ensuite qu'une semblable assimilation, qui ne semble devoir soulever aucune objection de principe, ne suffit pas à résoudre le problème.

Lorsqu'on livre une marchandise isolée, un colis, l'emballage de ce colis a un sens parfaitement net et aucune confusion ne peut résulter du fait que cet emballage est facturé au client pour sa valeur ou une partie seulement de sa valeur selon les cas. La situation est toute différente en ce qui concerne l'énergie électrique. D'une part, la marchandise principale livrée dans ce cas est de l'énergie active provenant d'un agent invisible, l'électricité, et l'on aurait bien de la peine à faire comprendre à un abonné que cette énergie comporte un emballage. D'autre part, on ne livre pas des emballages distincts qu'on puisse caractériser individuellement ; il s'agit d'une livraison *continue* d'un emballage qui varie constamment, et sans rapports forcés avec la marchandise principale, de sorte que l'assimilation, si naturelle qu'elle paraisse à des électriciens avertis, serait extrêmement difficile à saisir pour des non initiés. Enfin, le fait que l'emballage est assez souvent retourné au fournisseur, de sorte qu'on ne paie qu'un prix réduit en ce qui le concerne, n'autorise pas à dire que cet emballage n'est pas livré avec la marchandise. Quand on a besoin d'argent et qu'on trouve un prêteur, il est bien entendu que cet argent, qui est effectivement livré à l'emprunteur, sera intégralement restitué par lui à l'échéance, et en outre que le prêteur sera indemnisé dans l'in-

tervalle au moyen de certains versements proportionnels au montant du prêt et au temps. On peut comparer cette situation à celle de l'énergie réactive oscillante qui est livrée à l'abonné pendant une demi-période, puis restituée par lui pendant la demi-période suivante et ainsi de suite, et pour laquelle il effectue un versement proportionnel à sa valeur pendant cette demi-période, ces versements successifs étant totalisés pendant des périodes de temps assez longues pour que les paiements ne soient pas inutilement rapprochés.

Le fait même des versements effectués par le client pour l'énergie réactive oblige à désigner par un nom l'unité de compte de cette énergie réactive, comme on désigne toutes les bases de paiement ; quand on vend de la toile d'après la longueur, on en vend tant de mètres ; quand on vend du charbon au poids, on en vend tant de kilogramm ou de tonnes. Les distributeurs en sont réduits à dire qu'ils vendent tant d'*unités* d'énergie réactive, ce qui présente le double inconvénient d'être trop long et d'être mal défini, puisque les unités du système décimal ne sont définies, quand elles ne sont pas précisées par un nom, qu'à une puissance de 10 près : l'unité de longueur, par exemple, est tout aussi bien le centimètre que le mètre ou le myriamètre, mais on sait de quoi on parle quand on emploie l'une ou l'autre de ces unités de longueur, tandis qu'on ne le sait pas lorsque l'unité n'est pas dénommée. Il en résulte des complications verbales qui deviennent à la longue d'autant plus intolérables que les paiements d'énergie réactive se multiplient davantage.

Le nom de l'unité d'énergie réactive se déduira, d'ailleurs, nécessairement du nom de l'unité de puissance réactive par l'adjonction du préfixe *kilo* et du mot *heure*, de sorte que c'est à l'*unité de puissance réactive* qu'il convient de donner un nom.

M. Boucherot nous dit, il est vrai, qu'il ne sent pas le besoin de cette innovation et qu'il emploie à cet effet sans difficulté le *watt réactif*. Sans insister sur les graves inconvénients qu'entraîne dans la pratique l'emploi d'un nom d'unité en deux mots lorsqu'il s'agit d'une unité d'usage très fréquent et très répandu, ni sur la contradiction qu'il y a de la part de M. Boucherot à employer le mot *watt* alors qu'il considère la puissance réactive comme n'étant pas une puissance, je dois dire nettement que l'expression *watt réactif* me paraît défectueuse en principe.

Autant il est naturel d'adjoindre à un mot tel que *puissance*, dont

le sens s'étend à diverses variétés, un adjectif pour désigner spécialement telle ou telle variété, autant il me paraît inadmissible de prendre le nom de l'unité d'une de ces variétés, la puissance active, pour en faire, en y ajoutant simplement un adjectif, le nom de l'unité d'une autre de ces variétés.

De nombreuses propositions ont été formulées au sujet de ce nom ; j'ai déjà exposé pourquoi j'étais d'avis qu'aucune d'elles ne me paraissait réaliser toutes les conditions nécessaires. Je n'y reviendrai pas pour le moment, et me bornerai à rappeler quelques considérations générales.

Pour se rendre compte des nécessités qui s'imposeront dans la formation ultérieure du nom de l'unité d'énergie réactive, il suffit de se reporter à ce qui s'est passé pour l'énergie active. Le système d'unités électriques pour la pratique comporte une unité de puissance active, le *Watt*, et une unité d'énergie active, le *Joule*. Le Watt se trouvant dans de nombreux cas trop petit, on a été amené à employer de préférence le kilowatt, ce qui est parfaitement régulier. On aurait dû, par conséquent, employer également le kilojoule ; mais le Joule, régulièrement formé du point de vue scientifique au moyen de la seconde comme unité de temps, ne cadre pas avec les besoins de la pratique où l'heure est une unité plus commode que la seconde dans les questions de production (on a généralement employé le cheval heure comme unité d'énergie mécanique autrefois), ce qui obligerait à faire intervenir constamment dans les calculs un coefficient 3 600, très incommode.

Les mêmes raisons interviendront pour amener les mêmes résultats en ce qui concerne la puissance et l'énergie réactives. Il est de toute nécessité que l'unité d'énergie réactive rentre dans le système général et soit, par conséquent cohérente avec le watt, en d'autres termes que des indications de puissance réactive et de puissance active installés en un même point d'un réseau marquent le même nombre de divisions lorsque l'on aura

$$\sin \varphi = \cos \varphi,$$

c'est-à-dire pour un déphasage égale à  $\frac{\pi}{4}$ . Dans ces conditions, l'unité sera trop petite et l'on emploiera forcément la kilo-unité, qui correspondra au kilowatt de puissance active et au kilovoltampère de puissance apparente ; d'autre part, lorsqu'on passera à l'énergie, on emploiera nécessairement l'heure comme unité de temps, de même que

pour l'énergie active, ce qui obligera à la formation du nouveau mot kilo-unité-heure, et imposera au nom à donner à l'unité de puissance réactive certaines sujétions, que j'ai brièvement indiquées antérieurement.

En ce qui concerne ce nom, je ne reviendrai ni sur une proposition qui a été formulée ici même il y a un an, ni sur une évocation de la statue du Maréchal Foch qui a été faite au mois de juin dernier à l'une des réunions de la Conférence internationale des grands réseaux électriques à haute tension, mais je me sens obligé de maintenir les deux observations que j'ai présentées l'an dernier.

C'est une règle admise par le *consensus universalis* qu'on doit choisir les noms d'unités exclusivement parmi les morts ; cette règle a été rappelée autrefois par des savants éminents que tout le monde s'accorde à considérer comme ayant été des maîtres et à respecter. Je l'ai toujours envisagée comme bonne, car il naît suffisamment de discussions quand il s'agit de choisir le nom d'un mort qu'il y ait intérêt à ne pas y mêler celles qui résulteraient des relations que peuvent avoir les vivants avec les candidats éventuels également vivants. Les incidents auxquels j'ai fait allusion ne sont évidemment pas de nature à modifier mes idées sur ce point.

D'autre part, l'adoption éventuelle d'un nom pour cette unité ne peut évidemment résulter que d'un accord international. Jeter publiquement à l'improviste dans la mêlée le nom d'une personne appartenant à un pays déterminé sans avoir sondé les idées des représentants des autres pays me paraîtrait constituer une méthode présentant peu de chances de succès, et risquant, au contraire, de faire échouer définitivement le nom que l'on désirait voir adopter.

Je me résume. J'espère avoir démontré par ce qui précède :

- 1° que la puissance réactive est de la nature d'une puissance,
- 2° que l'énergie réactive est de la nature d'une énergie,
- 3° que le producteur est obligé de produire et le distributeur de transporter de l'énergie réactive oscillante pour les besoins de ceux des abonnés qui ne consentent pas à la produire eux-mêmes,
- 4° que cette production et ce transport, qui ne sont pas gratuits, peuvent être normalement rémunérés par chaque abonné proportionnellement à l'énergie réactive qui le concerne, au moins tant qu'il s'agit de tensions et de courants sinusoïdaux.

J'ai rappelé en outre, en les confirmant et les développant dans la mesure nécessaire, quelques considérations que j'avais formulées il y a un an au sujet des unités de puissance et d'énergie réactives.

Je suis bien certain de n'avoir pas épuisé le sujet ; j'espère cependant avoir réussi à dissiper quelques malentendus.

M. BOUCHEROT. — Je ne crois pas nécessaire d'insister sur l'extension de ce que j'ai dit à la quantité d'électricité, qui n'est pas de l'énergie et n'a pas de valeur par elle-même.

Si j'ai proposé une assimilation commerciale plus conforme à la réalité que celle de M. Brylinski, j'ai dit en même temps que je n'en vois pas la nécessité et qu'il suffit d'exposer les raisons vraies telles qu'elles sont. Je n'insiste pas et j'aborde les choses sérieuses.

J'ai déjà dit que je passe volontiers sur l'emploi de l'expression *puissance réactive* pour  $U I \sin \varphi$ , mais que je trouverais tout à fait mauvais que l'on emploie celle d'*énergie réactive* pour  $\int U I \sin \varphi dt$ . L'adjectif ne peut pas modifier le substantif à ce point que l'énergie réactive ne soit plus de l'énergie. Il y a une énergie réactive, mais ce n'est pas cette intégrale : celle-ci, je l'ai déjà dit, n'est qu'une fiction mathématique. Je m'explique.

En vous reportant à « l'Eclairage électrique » de 1906 vous trouverez une étude très intéressante de M. Nougier qui l'avait amené à cette conviction que la Puissance réactive est l'amplitude de la partie oscillante de l'énergie, que M. Nougier appelait la puissance compensée, par opposition à la puissance dépensée. Je me suis convaincu dès cette époque que ceci n'est vrai que dans certains cas particuliers, je l'enseigne depuis longtemps (voir, par exemple, l'*Industrie Electrique* du 10 novembre 1912, page 488 ; mais c'est antérieur à cette date) ; il y a une infinité d'autres cas particuliers pour lesquels ce n'est pas vrai. Si l'on considère, par exemple, le cas le plus simple d'un système récepteur constitué par deux circuits inductifs en parallèle, on voit très bien que, *généralement*, la puissance réactive n'est pas l'amplitude de la puissance compensée, ou oscillante, contrairement à ce que paraissent croire bien des personnes. Je donne cette démonstration en annexe pour ne pas surcharger mes explications : ceci est vrai pour bien d'autres systèmes récepteurs que l'on pourrait envi-



sager, et la formule bien connue sur laquelle s'appuie M. Brylinski pour son raisonnement :

$$ui = (UI \cos \varphi) (1 - \cos 2\omega t) - (UI \sin \varphi) \sin 2\omega t$$

ne correspond, dans ce schéma particulier, qu'au cas, particulier lui-même, d'une résistance pure en parallèle avec une self-inductance pure.

L'énergie réactive c'est, à proprement parler, l'énergie intrinsèque, emmagasinée pendant un quart de période par le récepteur : c'est l'amplitude de la puissance compensée, ou oscillante, divisée par la pulsation. Il n'y a pas de relation générale entre cette énergie et la puissance réactive ; il n'y a que des relations particulières, en nombre infini. Il peut même y avoir énergie réactive (au sens où j'emploie ce mot) sans puissance réactive, et puissance réactive sans énergie réactive. J'indique, dans l'annexe, deux cas particuliers où cela est parfaitement compréhensible.

Quoiqu'il en soit, et quoique l'on fasse, l'intégrale, dans le temps, de la puissance instantanée n'est jamais autre chose que  $U I \cos \varphi$ .

Les raisons pour lesquelles il y a lieu de faire payer  $\int UI \sin \varphi dt$  par l'abonné ne sont déterminées que très indirectement par cette petite énergie intrinsèque que l'on prête à l'abonné pendant 1/200 de seconde : je les ai données il y a 12 ans.

Pour une bobine de self-induction absorbant 2 kW réactifs, l'énergie que l'on prête à l'abonné, qu'il restitue, que l'on lui reprête... etc.... 100 fois par seconde est de 6 joules environ ; elles vaut donc environ 3 millièmes de franc. Serait-ce là une raison pour lui faire payer 1 franc par heure de fonctionnement s'il n'y en avait d'autres ?

#### ANNEXE

La puissance réactive n'est pas toujours l'amplitude de la puissance compensée. Comme exemple :

Soit deux circuits inductifs en parallèle sur une tension :

$$u = \sqrt{2} U \sin \omega t.$$

Les courants y sont respectivement :

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin (\omega t - \varphi_1), \quad i_2 = \sqrt{2} I_2 \sin (\omega t - \varphi_2).$$

La puissance instantanée fournie au système est :

$$p = u(i_1 + i_2) = 2UI_1 \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi_1) + 2UI_2 \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi_2)$$

ou  $p = 2R_1 I_1^2 \sin^2(\omega t - \varphi_1) + 2R_2 I_2^2 \sin^2(\omega t - \varphi_2)$   
 $+ UI_1 \sin \varphi_1 \sin 2(\omega t - \varphi_1) + UI_2 \sin \varphi_2 \sin 2(\omega t - \varphi_2).$

Les deux premiers termes représentent bien la puissance instantanée *dépensée* dans les résistances ; donc les deux autres termes représentent la puissance compensée. Ceux-ci peuvent se mettre sous la forme d'un seul terme en  $2 \omega t$  dont l'amplitude est :

$$\sqrt{U^2 I_1^2 \sin^2 \varphi_1 + U^2 I_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2U^2 I_1 \sin \varphi_1 I_2 \sin \varphi_2 \cos 2(\varphi_1 - \varphi_2)},$$

tandis que la puissance réactive totale est :

$$UI_1 \sin \varphi_1 + UI_2 \sin \varphi_2.$$

La puissance réactive n'est donc l'amplitude de la puissance compensée que si

$$\varphi_1 = 0, \quad \text{ou} \quad \varphi_2 = 0, \quad \text{ou} \quad \varphi_1 = \varphi_2, \quad \text{ou} \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \pi.$$

La puissance réactive fournie au système peut être nulle pour

$$(I_2 \sin \varphi_2 = -I_1 \sin \varphi_1)$$

sans que la puissance échangée le soit nécessairement. Un cas très simple est celui où

$$I_1 = I_2 \text{ et } \varphi_2 = -\varphi_1 = \frac{\pi}{4} :$$

les deux courants sont en quadrature ; la puissance instantanée *dépensée* est constante,  $p = 2RI_1^2$ , comme s'il s'agissait d'un courant continu et cependant, comme la puissance instantanée fournie est

$$2\sqrt{2} UI_1 \sin^2 \omega t,$$

la puissance compensée est

$$-\sqrt{2} UI_1 \cos 2\omega t,$$

bien que la puissance réactive soit nulle.

Réciproquement, la puissance compensée peut être nulle sans que la puissance réactive le soit nécessairement.

Un cas très simple est celui où

$$I_1 = I_2 \text{ et } \varphi_1 = \varphi_2 + \frac{\pi}{2}$$

(réactances de même signe dans chaque dérivation, mais résistances de signes contraires ; on sait qu'il y a plusieurs manières de réaliser des résistances négatives). Les deux courants sont encore en quadra-

ture ; la puissance instantanée dépensée est de la forme  $-\sqrt{2}UI_1\sin 2\omega t$ , exactement comme la puissance instantanée fournie ; la puissance compensée est nulle, bien que la puissance réactive soit  $\sqrt{2}UI_1$ .

M. BRYLINSKI. — Je ne reviens pas sur ce que j'ai dit précédemment. Je me bornerai à signaler que les cas fort intéressants calculés par M. Boucherot sont des cas extrêmement particuliers.

Si l'on ne perd pas de vue que

$$\begin{aligned}R_1 &= Z_1 \cos \varphi_1, \\ \omega L_1 &= Z_1 \sin \varphi_1, \\ R_2 &= Z_2 \cos \varphi_2, \\ \omega L_2 &= Z_2 \sin \varphi_2.\end{aligned}$$

On constate aisément que les cas très remarquables mis en évidence dans l'annexe à ses observations correspondent à des self-inductances ou à des résistances négatives, qui sont évidemment réalisables, mais ne se rencontrent presque jamais chez les abonnés.

L'amplitude de la puissance réactive instantanée donnée par M. Boucherot peut s'écrire

$$UI \sin \varphi \sqrt{1 - 4\omega^2 L_1 L_2 \left( \frac{L_1 R_2 - R_1 L_2}{L_1 Z_2^2 + L_2 Z_1^2} \right)^2}$$

ce qui montre comme M. Boucherot l'a signalé, que le terme correctif s'annule complètement quand l'une des deux self-inductances est nulle ou lorsque les déphasages des deux circuits sont les mêmes.

Il suffit donc que l'un des deux circuits soit un circuit d'éclairage, ce qui est fréquemment réalisé, ou que les déphasages des deux circuits soient les mêmes pour que l'amplitude de la puissance réactive instantanée soit précisément  $UI \sin \varphi$ .

Dans les autres cas, la condition sera fréquemment réalisée d'une manière approximative. Envisageons, par exemple, deux circuits dont les facteurs de puissance soient respectivement 0,8 et 0,7. Le terme correctif prendra la valeur

$$\frac{0,017 Z_1 Z_2}{(0,7 Z_1 + 0,6 Z_2)^2}.$$

Si l'on numérote 2 le circuit de plus forte impédance et que l'on pose

$$Z_2 = \alpha Z_1$$

le terme correctif deviendra sensiblement égal à

$$\frac{0,017\alpha}{0,36\alpha^2 + 0,84\alpha + 0,5} = \frac{\alpha}{22\alpha^2 + 50\alpha + 30}.$$

Il restera toujours inférieur à 1/100, et ira en diminuant lorsque la disparité d'impédance des circuits ira en augmentant à partir de la valeur 1,36 de  $\alpha$ , tendant vers 0 quand  $\alpha$  croîtra indéfiniment.

Si l'on tient compte du double fait que, dans une installation d'abonné, les divers circuits en parallèle auront le plus souvent des impédances diverses et, par contre, des déphasages peu différents, on voit que ce terme correctif sera presque toujours petit dans la pratique.

Mais ces considérations n'étaient même pas nécessaires, car, en réalité, tout ceci est à côté de la question et l'objection de M. Bouche-rot ne porte pas pour les raisons suivantes.

Ne limitons pas le nombre des circuits en parallèle et envisageons ce qui se passe sur le  $n^{\circ}$  de ces circuits. On y a

$$u = R_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt},$$

d'où

$$ui_n = R_n i_n^2 + L_n i_n \frac{di_n}{dt}$$

et l'on voit immédiatement que la puissance réactive instantanée ou oscillante de ce circuit est

$$\omega L_n I_n^2 \sin 2(\omega t - \varphi_n) = (UI_n \sin \varphi_n) \sin 2(\omega t - \varphi_n).$$

Si donc je suppose placé sur ce circuit un compteur d'énergie réactive qui enregistrera

$$\int (UI_n \sin \varphi_n) dt.$$

ce compteur enregistrera précisément une énergie réactive qui, pour une demi-période, sera proportionnelle à l'énergie réactive oscillante du circuit pendant cette demi-période.

Le compteur de tête devra donc, pour enregistrer l'énergie réactive totale consommée par l'abonné, donner la valeur de

$$\Sigma \int UI_n \sin \varphi_n dt = \int U (\Sigma I_n \sin \varphi_n) dt.$$

Or, il résulte des équations de Kirchhoff que l'on a

$$I \sin \varphi = \Sigma I_n \sin \varphi_n,$$

par conséquent le compteur de tête devra enregistrer la valeur de

$$\int (UI \sin \varphi) dt,$$

ce qui justifie pleinement le raisonnement que j'ai présenté précédemment.

M. BOUCHEROT — Je pense que l'on a bien compris que si, pour démontrer que l'amplitude de la puissance compensée (que M. Brylinski appelle puissance réactive instantanée ou oscillante) n'est que *très rarement*  $U i \sin \varphi$ , j'ai pris comme exemple le cas le plus simple de deux circuits inductifs en parallèle, j'aurais pu prendre une infinité d'autres exemples aussi typiques : moteurs synchrones ou asynchrones combinés entre eux ou avec des résistances et des réactances...

Je suis bien d'accord avec M. Brylinski sur ce point que, pour un circuit ne contenant qu'une résistance et une réaction en série, la puissance compensée est bien celle de la formule qu'il reproduit *maintenant*. Quant au reste, il exprime simplement qu'il y a conservation de la puissance réactive ; je crois que je suis aussi d'accord avec lui sur ce point !

Je ne poursuivrai pas plus cette discussion.

M. LIÉNARD. — Je suis heureux de constater que M. Boucherot appuie la thèse que j'ai toujours soutenue qu'il n'y a aucune relation entre la puissance oscillante et la puissance réactive. Les décompositions de la puissance instantanée en plusieurs termes, présentées par M. Brylinski ou par M. Budeanu ou par M. Ilievici à l'appui de la thèse contraire ont un caractère artificiel et ne prouvent rien.

J'ai présenté à la sixième section l'étude d'un transformateur monophasé dont le secondaire alimente une simple résistance (avec self-inductance ou non). Le cas se présente pour des fours électriques. Si l'on calcule la différence entre la puissance instantanée fournie et celle employée à produire l'effet Joule, on trouve que cette différence (dite puissance oscillante et qui est égale à la variation par unité de temps de l'énergie magnétique du système) a une expression indépendante de celle de la puissance réactive.

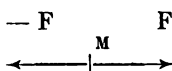
Ce n'est que dans un petit nombre de cas simples, tels que celui d'un conducteur unique dont la résistance et la self-inductance sont constantes, qu'il peut se produire cette particularité que la puissance oscillante ait un maximum précisément égal à la puissance réactive.

Mais dès qu'il y a plusieurs conducteurs (cas nécessaire en courants polyphasés) ou qu'il y a inductance mutuelle ou self-inductance variable par déformation ou saturation, toute particularité de ce genre disparaît.

M. JUPPONT. — Je regrette que mon éloignement de Paris ne me permette pas d'assister aux discussions de cette semaine.

Voulez-vous signaler à la sixième Section la simple remarque terminologique suivante :

Les forces *actives* et *réactives*, sont d'après les postulats de la mécanique, contrégales et appliquées au même point M



(elles sont  $F$  et  $-F$  ci-dessus).

En électrodynamique, les *puissances actives* et *réactives* des cou-

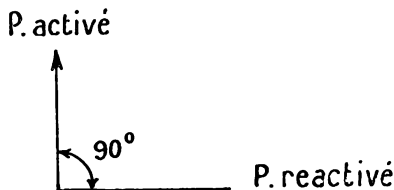


Figure 1.

rants sinusoïdaux sont orthogonales d'après le schéma habituel (fig. 1).

Il y a là une contradiction *logique* qui me paraît grave.

Ne pourrait-on pas la lever, dans le cas de la puissance, par d'autres adjectifs ne donnant pas lieu aux mêmes objections, tels que *utile* et *nuisible*.

On ne peut songer à *efficace* qui a une signification précise, mais *efficente* et *déficente* pouvant être envisagée...

Ce n'est qu'une suggestion.

Mes collègues sont plus qualifiés que moi pour résoudre la difficulté, qui doit troubler bien des cerveaux d'étudiants.

M. BRYLINSKI. — L'objection de M. Juppont ne serait pas dépourvue de valeur si le postulat de l'action et de la réaction était une loi générale, applicable à toute la physique et ne souffrant aucune exception. Or il n'en est rien.

Tout d'abord, le postulat ne s'applique, en principe, qu'aux actions mutuelles des points matériels et s'il a été étendu à d'autres cas, ces généralisations ne sont pas sans nécessiter quelques précautions.

Puis, si de la mécanique on passe à l'électricité qui est une branche au moins aussi importante de la Physique, on constate, par exemple, que le passage du courant dans un conducteur rectiligne a pour réaction, dans l'espace, la création d'un champ magnétique qui est, en chaque point, perpendiculaire au plan passant par le courant et le point envisagé. Il ne s'agit pas ici d'une loi élémentaire, que l'on pourrait compléter arbitrairement par divers termes infiniment petits, pourvu que leur intégrale le long d'un circuit fermé soit nulle, ni d'un postulat, mais d'un résultat expérimental hors de contexte, d'une généralité extrême et auquel la loi de l'action et de la réaction de la mécanique ne s'applique pas.

Mais, dans le domaine même de la Mécanique, il y a des réserves à faire. L'examen du postulat montre qu'il constitue essentiellement une loi *statique*, dont la vérification dans la pratique résulte seulement du fait qu'on n'a pu jusqu'à présent envisager que des corps matériels animés de vitesses très faibles par rapport à celle de la lumière ; le fait a entraîné, pour la Mécanique classique, d'autres conséquences graves ; il est la cause pour laquelle on a, jusqu'à une époque récente, considéré la *masse* comme invariable, alors que sa valeur dépend de la vitesse, et, d'autre part, la cause pour laquelle on a considéré, jusqu'à la même époque environ, le groupe de transformation de Galilée comme le seul vrai, alors que la plupart des savants estiment aujourd'hui que c'est le groupe de transformation de Lorentz qui est à employer dans les cas de mouvements rectilignes et uniformes.

Aussi n'y a-t-il pas lieu d'être surpris que M. J. J. Barré ait montré récemment <sup>(1)</sup> que la loi de l'action et de la réaction ne peut s'appliquer à des corps en mouvement.

Longtemps auparavant, Coriolis avait mis en évidence l'existence, dans un changement d'axes de référence en mouvement varié l'un par rapport à l'autre, de la force centrifuge composée, qui est perpendiculaire à la vitesse du point matériel envisagé par rapport au nou-

---

(1) Voir *Revue Générale de l'Electricité*, à propos de la loi de Laplace et de la Relativité ; T. XXVI, n° 9 du 31 août 1929, p. 323-326.

veau système de référence, de sorte que la force exercée par un point matériel sur un autre ne saurait être dirigée, dans tous les systèmes possibles de référence, suivant la droite qui les joint.

Il importe d'ailleurs de ne pas perdre de vue que l'adoption du mot *réactif* est l'aboutissement de longues discussions qui ont eu lieu en mars et avril 1904 à la *Société Internationale des Electriciens* en vue de définir les directions à donner à ceux de ses membres qui devaient prendre part au Congrès international des Electriciens de Saint-Louis (1904) pour obtenir le remplacement de l'adjectif *déwatté*. De nouvelles discussions sur ce sujet ne sauraient sans doute aboutir à un résultat nouveau et, si l'on veut éviter toute confusion dans l'esprit des étudiants, il serait plus sage de ne pas leur présenter le principe de l'action et de la réaction comme une loi fondamentale, intangible et ne souffrant aucune exception.

M. LIÉNARD — Je voudrais présenter quelques observations à propos de la question soulevée par M. Juppont.

M. Juppont dit que les puissances active et réactive des courants sinusoïdaux sont orthogonales. En réalité, sont seulement à angle droit les vecteurs représentant ces puissances. Mais il ne faut pas oublier que la représentation des puissances actives et réactives par des vecteurs est uniquement symbolique. Aux directions des vecteurs ne correspond aucune direction réelle de l'espace, contrairement à ce qui a lieu pour une force, une vitesse, etc., qui sont, par leur nature même, des grandeurs dirigées. Les puissances actives et réactives sont, au contraire, des grandeurs scalaires auxquelles ne correspond aucune direction particulière de l'espace. Aussi s'il est possible de les représenter par des vecteurs, ce n'est que d'une manière toute symbolique, par les deux vecteurs représentatifs ayant une direction quelconque, sous la seule réserve qu'ils soient à angle droit l'un de l'autre.

Cette remarque préliminaire me semble solutionner la première difficulté mentionnée par M. Juppont. Ceci dit, il semble bien que la dénomination de puissance réactive pour la quantité  $U I \sin \varphi$  ou  $\Sigma U I \sin \varphi$  soit peu heureuse. Cette dénomination s'appliquerait mieux à autre chose.

Faisons une comparaison avec la mécanique. L'équation fondamentale de la dynamique

$$\Sigma X - m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0$$



exprime que la force d'inertie  $-m \frac{d^2 x}{dt^2}$

joue vis-à-vis des forces réelles  $X$  le rôle d'une réaction.

De même, on peut donner le nom de force réactive à la force d'induction  $-L \frac{di}{dt}$

( $L$  supposé constant) qui représente la réaction du champ magnétique d'un courant variable sur ce courant. La puissance correspondante

est  $-Li \frac{di}{dt}$

et c'est cette quantité qui mériterait, mieux que  $U I \sin \varphi$ , de recevoir le nom de puissance réactive. Or  $-Li \frac{di}{dt}$

n'est autre chose que  $-\frac{dW}{dt}$ ,

en désignant par  $W$  l'énergie du champ magnétique et, par généralisation, on pourrait donner dans tous les cas le nom de puissance

réactive à  $-\frac{dW}{dt}$ ,

$W$  étant l'énergie magnétique du système. Dans le cas particulier du conducteur unique à inductance constante, le maximum de  $-\frac{dW}{dt}$  se trouve être égal à  $U I \sin \varphi$ , et l'on comprend que l'on ait été conduit à donner le nom de puissance réactive à  $U I \sin \varphi$ . Mais il est regrettable, car ainsi qu'il a été dit plus haut, il n'y a en général aucune relation entre  $E U I \sin \varphi$  et la quantité variable  $-\frac{dW}{dt}$ .

M. ILIOVICI présente son rapport sur *la définition des capacités* <sup>(1)</sup>.

M. le Président donne lecture de la lettre suivante que lui a adressée M. DELLA RICCIA :

« Au sujet de la Note de M. Illovici « Sur la définition des capacités », qui viendra en discussion samedi prochain devant votre Section, Note à laquelle vous faites vous-même certaines additions, je me permets de vous signaler mon article : « Sur les capacités et les conductances fictives des câbles à plusieurs conducteurs symétriques soumis à des tensions polyphasées », où vous trouverez entre autres cho-

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*; T. IX, 4<sup>e</sup> série, numéro octobre 1929, p. 1158.

ses une démonstration tout à fait générale de la formule  $CR = \text{const.}$ , avec quelques précisions nécessaires (paragraphe 8).

Cet article a paru dans la *Revue Générale de l'Electricité*, le 20 septembre 1919. »

M. LIÉNARD fait connaître qu'il a répondu à M. Della Riccia qu'il lui semblait que le point de vue de M. Ilievici n'était pas tout à fait le même que le sien.

M. DELLA RICCIA a répondu :

Dans ma précédente du 21 courant, je me rapportais à la formule du paragraphe 8 :

$$CR = \frac{1}{4\pi} \frac{\int_{\sigma} \frac{E}{\epsilon} d\sigma}{\int_{\sigma} \delta d\sigma} \cdot \frac{\int_s \rho \delta ds}{\int_s E ds} = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho}{\epsilon} = \text{Const.}$$

(sous les conditions  $\frac{E}{\epsilon \cdot \delta} = \text{Const.}$ ,  $\frac{\rho \delta}{E} = \text{Const.}$ )

où  $b$  et  $s$  sont la section et la longueur d'un tronçon de tube de force (du secteur  $E$ ) *quelconque*.

Ayant examiné en détail, comme cas *particulier*, au paragraphe 5, la question des différentes capacités d'un *câble* triphasé en fonction desquelles peut s'exprimer et mesurer la capacité « *fictive* » — (comme je la nomme depuis 1902) — d'un de ses *conducteurs*, je laisse de côté cette question pour montrer que, d'une manière tout à fait générale, *à tout théorème concernant une capacité particulière quelconque correspond nécessairement un théorème analogue concernant une conductance particulière quelconque correspondante* (même  $b$  et même  $s$ ).

De cette correspondance on peut se servir effectivement en pratique.

Plus loin, au § 10, je fais un autre rapprochement entre les coefficients électro-statiques et les complémentaires algébriques des coefficients d'induction électromagnétique en indiquant une autre correspondance, dont il ne semble pas possible de se servir pratiquement.

L'étude des différents coefficients de capacité des câbles triphasés remonte, comme vous le verrez par mes rappels d'articles antérieurs, à environ 20 ans.

M. LE PRÉSIDENT. — Il est évident que M. Della Riccia s'est occupé avant M. Ilievici de cette question des capacités des différents conducteurs. et à ce point de vue on ne peut que lui reconnaître la priorité.

Mais M. Miovici s'est placé dans sa communication à un point de vue pédagogique qui n'était pas dans les préoccupations de M. Della Riccia. Les deux communications ne font donc pas double emploi.

M. CHAUMAT résume son rapport sur *les vues modernes en électrostatique* <sup>(1)</sup>.

M. le Président estime qu'il serait très intéressant d'arriver à construire des machines électrostatiques puissantes. Reste à savoir si l'on obtiendra un résultat industriel.

M. BOUCHEROT. — Quelques uns de nos collègues ont déjà pensé à ces machines, et je doute qu'on arrive à des puissances spécifiques intéressantes. Il y a je crois une seule solution, c'est de les réaliser dans un vide très poussé, car, dans l'air à la pression ordinaire, on ne peut pas arriver à des tensions suffisamment élevées pour les capacités dont on dispose. Théoriquement, on pourrait aussi fonctionner aux hautes pressions, mais il est alors à craindre que les frottements soient prohibitifs.

M. CHAUMAT. — Pour la réalisation de machines électrostatiques à grande puissance volumique ou massique, on sera toujours arrêté par la faible valeur des pouvoirs inducteurs spécifiques des matériaux isolants usuels. Mais il est permis d'escompter quelques progrès dans cette voie.

Il est d'ailleurs des cas où l'on a besoin de différences de potentiels très élevées et où ne sont en jeu que de faibles puissances. Et alors on pourra, je crois, obtenir des machines électrostatiques intéressantes par leurs dimensions et leur poids et qui seront assez simples de construction.

M. DARRIEUS. — Je voudrais demander à M. Chaumat comment s'introduit cette notion de rendement organique ? Si l'on fait abstraction des pertes correspondant à des phénomènes physiques indépendants de cette théorie, on peut réaliser, on le conçoit aisément, une machine fonctionnant avec un rendement unité. Dans une machine vraiment industrielle, calculée comme nos machines usuelles,

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*; T. IX, 4<sup>e</sup> série, numéro d'octobre 1929, p. 1168.

il y aura des conditions de commutation à réaliser : on devra n'établir les connexions qu'entre conducteurs qui ont déjà atteint le même potentiel, et on ne devra couper ces connexions que quand le courant sera réduit à zéro. On peut toujours y parvenir, au moins théoriquement, en modélant convenablement les formes des armatures en présence.

Donc, de ce côté, il n'y a pas de limite au rendement, et les difficultés seront bien plutôt de réaliser une bonne utilisation de la machine pour des tensions élevées et des courants suffisants. M. Fabry a justement souligné la difficulté que constitue à priori, par rapport aux machines électromagnétiques, l'énorme disproportion entre les énergies par unité de volume correspondant en électrostatique à la rigidité diélectrique de l'air à pression atmosphérique, et par contre, du côté électromagnétique aux limites d'induction réalisables.

Peut-être pourrait-on travailler dans l'huile, mais alors ce sont les pertes mécaniques qui remplaceront les pertes par effluves ; ou dans l'air comprimé. De toutes façons le problème, depuis le replenisher de lord Kelvin, ne relève plus guère que de l'art du constructeur.

M. CHAUMAT. — Voici comment cette notion du rendement organique s'est présentée à mon esprit.

On pourrait concevoir des machines à influence qui fonctionneraient grâce à une charge initiale communiquée une fois pour toutes et permanente. La construction n'en serait pas simple et cela suppose un isolement parfait.

J'ai préféré envisager un autre mode de fonctionnement plus sûr. Le cycle est le suivant :

1° Une excitatrice charge la machine et lui communique une énergie

$$W_1 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}.$$

2° Dans un second temps, la machine transforme cette énergie et l'accroît par diminution de capacité à charge constante. Si la capacité devient  $m$  fois plus petite, l'énergie électrique devient  $m$  fois plus grande  $W_2 = mW_1$ .

3° Dans un troisième temps, cette énergie finale est tout entière utilisée dans un circuit extérieur.

Puis, tout recommence, car la machine est déchargée.

D'où un rendement que j'ai appelé rendement organique et qui est

$$\frac{W_2}{W_1 + W_2} = \frac{m}{m + 1},$$

Le rendement organique qui est un rendement théorique peut être fort élevé.

Le rendement réel sera diminué comme d'ordinaire par les défauts d'isolement, les différentes pertes.

Ce mode de fonctionnement se résume de cette façon assez particulière : C'est l'excitatrice qui fournit le débit sous basse tension et c'est

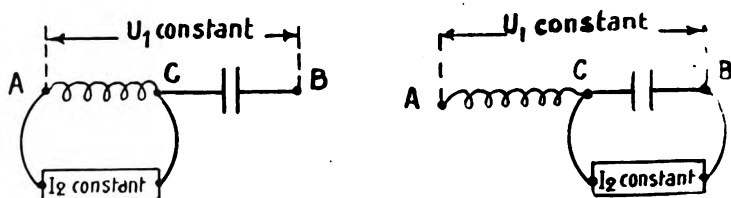


Figure 2.

la machine proprement dite qui donne la haute tension et la puissance.

M. BUNET présente son rapport sur les *dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de M. Boucherot* (1).

M. BOUCHEROT. — Je voudrais profiter de ce qu'on parle de cette question pour vous mettre au courant de conséquences, qui ne manquent pas d'intérêt, des propriétés des montages résonants.

Deux dispositifs permettent de transformer une tension constante en courant constant. Celui que j'ai donné en 1890, que rappelait Bunet tout à l'heure, qui peut prendre deux aspects différents (fig. 2), et un autre que j'ai donné en 1895, dont on peut remarquer que le schéma est une pyramide (fig. 3) triangulaire dans l'espace.

Ce dernier est moins coûteux à réaliser que l'ancien, les appareils sont plus petits. Il présente en outre l'avantage d'égaliser les puissances apparentes et c'est là que découlent quelques remarques intéressantes.

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*; T. IX, 4<sup>e</sup> série, numéro d'octobre 1929, p. 1179.

On a  $U_1 I_1 = U_2 I_2$ , tandis que, dans l'autre  $U_1 I_1 > U_2 I_2$  ; de sorte qu'on est en présence d'un appareil qui restitue intégralement la puissance *apparente*.

Or, de cette égalité résulte une propriété assez curieuse. Nous avons, en effet  $U_1 = S I_2$ ,  $S$  étant la réactance de l'une des selfs, par exemple.

Cette égalité implique aussi

$$U_2 = \frac{U_1 I_1}{I_2} = S I_1.$$

Il y a réversibilité et réciprocité.

Si on appelle indépendances primaire et secondaire les quotients

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{et} \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2},$$

il résulte de ceci que le produit  $Z_1 Z_2$  est constant et égal à  $S^2$ , la réac-

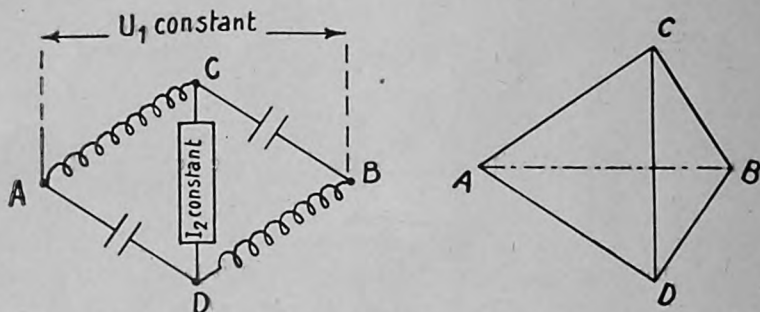


Figure 3.

tance  $S$  est moyenne proportionnelle entre les indépendances, entre les sommets.

Voilà ce qui est intéressant, l'une des indépendances est toujours l'inverse de l'autre, c'est-à-dire que ce système constitue encore un transformateur inversible de l'impédance, autrement dit, quand on a une impédance nulle d'un côté elle est infinie de l'autre, et réciproquement.

Et c'est là, au fond, ce qui permet d'utiliser ce même montage comme filtre en T. S. F.

Sans entrer dans le détail je vous rappelle que les filtres sont des montages permettant de sélectionner les fréquences. C'est une conséquence du fait que l'impédance est infinie d'un côté quand elle est nulle de l'autre.

L'ancien montage n'a pas cette propriété et cependant on peut la lui donner en y ajoutant une self ou une capacité (fig. 4).

On a cette fois  $U_1 I_1 = U_2 I_2$ , et ce sont encore des montages employés comme filtres en T.S.F.

Autre remarque :

On est tout porté à croire, et j'ai cru pendant longtemps, que cette égalité  $U_1 I_1 = U_2 I_2$  est vraie aussi pour les puissances réactives, puisque les puissances réelles sont égales. C'est faux. La puissance réactive, primaire, est égale à la puissance réactive secondaire changée de signe. Il convient de faire attention à ce détail qui ne s'aperçoit pas toujours de suite.

M. LIÉNARD. — Dans la formule  $Z_1 Z_2 = S^2$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  sont des valeurs réelles. La relation resterait-elle vraie si on prenait les valeurs imaginaires (ou symboliques) ?

M. BOUCHEROT. — J'ai toujours eu une antipathie irrésistible pour les imaginaires dont je ne parle presque jamais dans mon enseigne-

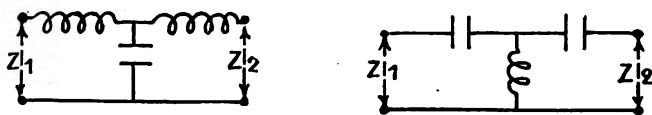


Figure 4.

ment, ce qui ne m'empêche pas de m'en servir pour quelques calculs. Un de nos plus grands ingénieurs électriciens — dont je tairai le nom — a fait avec les imaginaires un travail qui est faux, à mon humble avis. Plus exactement, c'est une démonstration dont il manque la moitié. Quand on se sert d'imaginaires, on ne sait donc pas à quoi on s'expose. On peut se tromper avec tous les modes de calcul, mais bien plus encore avec celui-ci.

Et puis, j'estime que c'est un peu illusoire ; évidemment, cela permet quelquefois de faire des calculs rapides, mais l'interprétation des résultats est beaucoup plus longue que le calcul lui-même.

Ainsi, ceux qui suivent ce que je fais savent que j'ai traité longuement les questions de propagation du courant alternatif sur les longues lignes uniquement par les puissances réelles et réactives ; on arrive ainsi à des choses très simples. Quand on traite le problème par

les imaginaires, cela paraît d'une simplicité encore plus grande, on arrive à ce résultat que la tension le long de la ligne est un cosinus hyperbolique imaginaire !

Il n'y a plus qu'à savoir ce que c'est en réalité.

Je regrette, M. le Président, de n'être pas assez familiarisé avec les imaginaires pour pouvoir vous répondre de suite.

M. LIÉNARD. — Il sera intéressant de savoir si, en passant en notation symbolique par les imaginaires on vérifie que la relation subsiste <sup>(1)</sup>.

M. DARRIEUS. — La prévention de M. Boucherot, à l'égard des imaginaires, ne tient-elle pas en partie à un manque de précision dans

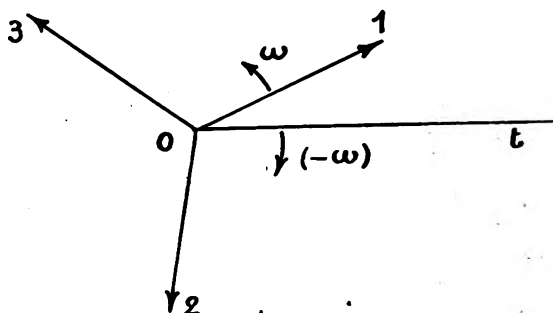


Figure 5.

l'exposé qui est fait de la signification physique de la théorie ? Steinmetz qui a été un propagandiste de cette méthode en distingue deux formes d'emploi assez voisines, tandis qu'il est possible d'établir une distinction plus essentielle entre deux modes différents d'application des imaginaires ou des diagrammes qui en sont la traduction.

D'habitude en courants polyphasés, on représente à la fois les grandeurs correspond aux diverses phases, par exemple, le courant de la phase 1 en avant de  $120^\circ$ , sur le courant de la phase 2, et en retard de  $120^\circ$  sur le courant de la phase 3 (fig. 5). On convient que ce diagramme représente les valeurs instantanées par la projection sur un certain axe  $ot$  ou ligne des temps, que l'on peut imaginer fixe en supposant que le diagramme tourne, ou bien qui peut être supposé tournant sur le diagramme immobile.

(1) M. LIÉNARD a vérifié depuis la séance que la relation  $Z_1 Z_2 = S^2$  est vraie aussi bien en notation symbolique qu'en valeur arithmétique.



Une autre sorte de diagramme est implicitement employée par divers auteurs, par exemple Miles Walker dans son traité de l'Electrotechnique, et par beaucoup d'auteurs français qui y ont eu recours sans le spécifier expressément.

Dans cette méthode, on ne considère qu'un vecteur pour les trois phases, mais trois lignes des temps. Par exemple, le même vecteur I donnera (fig. 6) les courants dans les trois phases, par projection sur trois lignes des temps, 1, 2, 3 à  $120^\circ$ . Cette fois, c'est le vecteur qui tourne à la vitesse  $\omega$  et cette représentation est plus suggestive en ce que, la pensée, nous pouvons attacher les trois lignes des temps à la

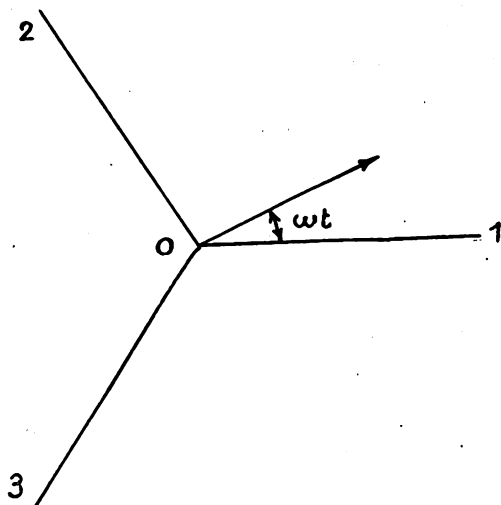


Figure 6.

machine elle-même (entrées de phase), le centre de rotation du vecteur correspondant à l'axe de la machine.

Cette méthode se prête également à représenter les cas non équilibrés ; par exemple le cas du monophasé correspondra à l'oscillation du vecteur selon sa propre direction ; dans le cas du régime polyphasé, déséquilibré, le point figuratif décrira une ellipse suivant la loi des aires ; ce qui est l'expression, dans le cas du monophasé, du théorème de Leblanc et, dans le cas plus général, de la théorie du déséquilibre (Stokvis, Fortescue, Genkin, etc...)

Dans la théorie des diagrammes, par exemple de Blondel, les vecteurs flux ou ampère-tours peuvent être ainsi conçus comme attachés

à la roue polaire elle-même, et plusieurs auteurs, précisément, figurent sur le diagramme, l'indication du contour des pôles.

De ce point de vue, les imaginaires qui ne sont que la traduction analytique des diagrammes font encore appel à l'intuition physique dans les cas de régime transitoire, où l'on doit de représenter que le vecteur décrit non plus un cercle ou une ellipse, mais une courbe plus compliquée, par exemple, dans le cas que M. Boucherot a traité pour les alternateurs des régimes transitoires de court circuit, une spirale logarithmique pour chacun des termes « continu » et « alternatif » en lesquels la théorie montre que peut se décomposer le cas le plus général.

M. LIÉNARD. — Il est certainement très commode de se représenter un facteur comme indiquant simplement une rotation. Cette manière d'opérer constitue une méthode symbolique, mais ne portant que sur des grandeurs parfaitement réelles.

M. DARRIEUS. — En somme, le vecteur est attaché au champ tournant.

M. BOUCHEROT. — J'ai constaté que ceux qui se servent des imaginaires se trompent facilement, surtout quand ce sont des jeunes gens à peine sortis des écoles.

M. DE LA GORCE présente le *Projet des clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance*

M. LIÉNARD. — La somme de travail que ce projet représente dépasse évidemment de beaucoup en importance sa longueur apparente et il nous apporte une base de discussion très substantielle.

M. LEBAUPIN. — M. de la Gorce indique 4 fois la tension normale pour des appareils de 250 volts. C'est un chiffre un peu élevé.

En général, on prend pour la tension alternative d'essai deux fois la tension normale, et ensuite pour la tension continue, environ 2 fois et demi la tension alternative d'essai.

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*; T. IX, 4<sup>e</sup> série, numéro d'octobre 1929, p. 1187.

M. DE LA GORCE. — Le cahier des charges indique 5 fois.

M. LEBAPIN. — On peut aller beaucoup au-dessus de ce chiffre. J'ai eu l'occasion d'essayer après pose une longueur de 20 km de câble à la tension d'environ 105 000 V, alors que la tension normale était de 15 000 V, ce qui fait 7 fois la tension normale. Il n'y avait aucune difficulté, seulement on est obligé de baisser à 5, pour tenir compte de la pose qui torture les câbles et des boîtes de jonction qui sont des points faibles.

Je crois que fixer pour les condensateurs la tension d'essai à 4 fois la tension normale est très raisonnable.

M. DE LA GORCE. — On s'est basé sur le rapport trouvé pour les câbles entre les tensions en courant continu et en courant alternatif.

Pour les condensateurs, je ne sache pas qu'il y ait eu des expériences suffisantes. L'industrie des condensateurs n'est pas encore arrivée à la constante de perfection atteinte pour les câbles. De sorte qu'il ne faut peut-être pas dès maintenant fixer des chiffres trop élevés.

M. CAYE. — Les essais de tension ne donnent aux usagers qu'une garantie très approximative, et non une certitude sur la qualité des appareils.

En effet, ces essais doivent être effectués à une valeur de la tension suffisamment faible pour ne pas détériorer le diélectrique, et on peut imaginer une quantité de condensateurs, ayant subi avec succès les essais de tension de recette et ne pouvant satisfaire aux conditions d'emploi ou convenir à un service prolongé à la tension normale de service.

Nous pensons qu'il serait utile d'introduire l'idée d'une tension de perforation en fonction de la contrainte du diélectrique, ce qui correspondrait, à peu près, à la notion connue de la limite d'élasticité des matériaux.

Les autres garanties sont données par la mesure des pertes, d'une part, et, d'autre part, au moyen d'un essai de surcharge de longue durée.

Enfin il serait intéressant de connaître l'opinion des usagers, en ce qui concerne les garanties minima réellement nécessaires pour l'emploi envisagé.

M. DE LA GORCE. — En introduisant l'essai au percement on recourrait au procédé employé pour les porcelaines, où l'on distingue un essai poussé jusqu'à la destruction, et des essais de réception proprement dite dans lesquels on se limite à une tension qui ne peut pas altérer l'appareil condensateur.

M. B. CHEVALIER. — Les essais à des tensions supérieures à celles indiquées, s'ils donnent un supplément de garantie à l'usager, présentent un grave inconvénient : la nécessité de voir le condensateur résister aux essais conduira le constructeur à exagérer l'épaisseur de la lame diélectrique ; or, lorsque cette épaisseur croît, elle entraîne proportionnellement à son carré, une diminution de la capacité du condensateur et une augmentation parallèle du prix de revient.

Dans de telles conditions, il serait impossible au condensateur de lutter contre le moteur compensateur qui, bien que d'une exploitation plus onéreuse, est d'un prix d'achat moins élevé.

D'ailleurs, personnellement, j'estime les conditions indiquées par M. de la Gorce comme suffisantes : j'ai, depuis plusieurs années, fait essayer des condensateurs de redressement dans des conditions voisines de celles du projet et je n'ai jamais eu à déplorer de ruptures, lorsque les condensateurs n'étaient soumis qu'aux tensions prévues.

Je tiens à signaler, d'ailleurs, qu'il ne faudrait pas extrapoler les conditions du projet pour des fonctionnements au-delà de 500 V à ces tensions, la tenue des condensateurs en papier imprégné est mal connue, et les installations de redressement à tension élevée, emploient comme diélectrique, le verre, le papier huilé ou le papier bakéliné.

Il y aurait, pour déterminer les conditions d'essai pouvant donner toute garantie à l'usager, à faire une étude approfondie.

M. BUNET. — L'usager ne sait guère ce qu'il peut demander. Le constructeur cherche à ne pas trop augmenter son prix de revient, or si l'on impose un essai à quatre fois la tension de service, le prix de revient augmente de 50 pour 100.

M. LIÉNARD. — Le constructeur peut savoir ce qu'il est à même de garantir et nous donner des indications. Il n'y a intérêt à limiter la tension maxima d'essai que si son élévation augmente beaucoup le prix de revient. Au cas contraire, il vaut mieux avoir des appareils résistant à 5 ou 6 fois la tension normale plutôt qu'à 3 ou 4.

M. BAYLE présente son rapport sur *l'universalité nécessaire du système métrique* (1).

M. DARRIEUS. — Si j'ai bien compris, ce que propose M. Bayle consisterait à libérer l'unité de poids du défaut qui lui est reproché, à savoir de dépendre du lieu et du temps.

Pour cela, il propose de substituer au poids réel un poids fictif, non plus à la latitude de  $45^\circ$ , mais en un certain point où la gravité présenterait la valeur constante à 9,8.

Je demanderai à M. Bayle pourquoi il ne préfère pas prendre tout de suite 10 pour cette gravité fictive normale ?

M. BAYLE. — Je suis d'accord.

M. DARRIEUS. — Nous savons qu'on peut creuser un puits assez profond pour trouver quelque part la gravité 10, avec autant de sûreté que la gravité 9,8, ou la gravité 9,80665, à la latitude de  $45^\circ$ . Mais, substituer ou associer ainsi à la masse un poids fictif, n'est-ce pas traîner un poids lourd inutile.

Un peu plus loin, M. Bayle écrit, dans les conclusions  $F=M$ . C'est faire de ce poids fictif un simple aspect de la masse, de sorte qu'autant vaut ne considérer que la masse.

Quant à ce qui est de la signification originelle de l'étalon, M. Ch.-Ed. Guillaume a justement insisté sur ce que, dans l'intention même des fondateurs du système métrique (ses citations sont assez frappantes) l'étalon de matière était déjà un étalon de masse, parce qu'il n'y a qu'un attribut physique de la matière qui lui soit réellement inhérent, c'est la masse.

Encore une fois, on l'oublie trop, le poids dépend non seulement du lieu, mais du moment, car les marées font changer la gravité en un endroit donné.

Il est donc très heureux que les fondateurs du système métrique, nous pouvons en être convaincus actuellement, aient d'emblée considéré l'étalon de matière comme représentatif de la masse, et non du poids. De sorte que le véritable système métrique, en dépit de l'interprétation erronée et déplorable qui a prévalu au XIX<sup>e</sup> siècle, n'est

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*; T. IX, 4<sup>e</sup> série, numéro de septembre 1929, p. 1020.

pas le système des mécaniciens, mais un système masse, longueur, temps. Gauss en particulier et l'Association britannique, en proposant le système CGS, n'ont donc pas innové ou détourné des mots comme pesée de leur sens initial, mais suivi les directives qu'avaient données, dès le début, les fondateurs du système métrique, dépouillé seulement le langage scientifique de ce qu'il présentait encore d'imparfait au XVIII<sup>e</sup> siècle.

Quant à la difficulté prétendue de saisir la notion de masse, je ne la crois pas réelle, et on peut prétendre qu'au XX<sup>e</sup> siècle, même dans l'enseignement primaire, ou dans les arts manuels, cette notion s'acquiert très facilement.

Maxwell signale déjà deux exemples propres à faire bien saisir la signification de la masse comme distincte du poids, à savoir l'impression d'inertie que donne la manœuvre d'une lourde meule, ou cette expérience qui consiste, en portant une longue poutre sur l'épaule, à l'engager dans un couloir étroit. Ces manipulations donnent bien la sensation de ce que c'est qu'un moment d'inertie ; mais de nos jours, l'assimilation des notions de masse et d'accélération est devenue encore plus facile, puisque les enfants ont de bonne heure entre les mains des machines simples d'où le frottement est presque éliminé, comme celles qui comportent des roulements à billes, les roues de bicyclette par exemple, que beaucoup, tant soit peu curieux de mécanique, ont démontées de leurs mains. Les gyroscopes, les volants donnent aussi lieu à de belles expériences qui peuvent être répétées jusque dans l'enseignement primaire.

Pour faire prévaloir les droits de la masse, nous devons déplorer que la lune ne soit pas 10 fois plus proche, ou que nous ne soyons pas nés sur une étoile double, auquel cas personne ne songerait sérieusement à considérer le kilogramme comme un étalon de poids.

M. BAYLE. — Vous avez démontré comment on peut rendre la masse sensible. Et, c'est un homme qui a remué toute sa vie des masses et des poids qui vous parle, je connais donc la masse depuis ma tendre enfance

Mais tout votre raisonnement porte, je crois, sur des applications de la loi de Galilée. Pour mettre une masse en mouvement, il faut la pousser, la tirer, la masse paraît de cette façon dériver de la loi de Galilée. Mon point de vue est tout à fait différent, il n'est pas besoin de connaître la loi de Galilée pour avoir la sensation de masse. Et

pour différencier la masse du poids, il faut faire l'étude de la pesanteur, et savoir qu'on ne peut le faire que par la loi de Galilée. Mais, pour bien faire comprendre la masse aux jeunes gens qui ne font pas de mécanique d'une façon approfondie, il faut construire un ressort, le transporter à Paris, puis à Marseille, et montrer que la même masse suspendue ne donne pas la même longueur au ressort. La notion de masse apparaît. Nous avons transporté avec nous une masse, non une force, et nous n'avons rien mis en mouvement. J'ai trouvé ce point de vue exposé dans un livre récent, la Thermodynamique de Bruhat.

Maintenant, pourquoi 9,80 ? C'est que pour tous les hommes, sauf vous, le kilogramme est le poids du bloc Fortin. Ce poids, ils le promènent avec eux partout, et c'est toujours un kilogramme. C'est le kilogramme pratique, qu'il ne faut pas changer et qui ne doit pas différer trop du kilogramme théorique, du vôtre.

Sur une zone extrêmement considérable, autour du parallèle de  $45^{\circ}$ , la gravité a pour mesure 9,80, à quelques millièmes près, et par conséquent, dans tous les pays civilisés, où vivent les savants, le poids local du bloc Fortin est le kilogramme. La gravité est plus forte de 0,02 au pôle et plus petite de 0,02 à l'équateur. En adoptant 9,80 on uniformise le kilogramme.

---

# INFORMATIONS

## DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS

---

### 1. — Nomination de M. Paul Janet comme Président d'honneur.

*Les lettres suivantes ont été échangées entre M. Paul Janet, Président d'honneur, et M. Parodi, Président de la Société Française des Electriciens :*

Le 19 janvier 1930.

M. Paul Janet,  
Membre de l'Institut

Mon cher Collègue,

« Je suis heureux de vous faire connaître que, dans son Assemblée générale du 5 janvier dernier vous avez été élu, à l'unanimité de 617 voix, Président d'Honneur de notre Société.

« Je n'ai pas besoin de vous dire que cette marque toute particulière d'estime et de reconnaissance s'adresse aussi bien à l'homme que nous entourons tous de notre respectueuse sympathie, qu'à l'animateur des œuvres d'enseignement de la Société Française des Electriciens.

« Veuillez agréer, mon cher collègue, l'expression de mes sentiments les plus distingués.

Signé : PARODI.

M. Parodi,  
Président de la Société Française  
des Electriciens.

Monsieur le Président,

« Vous avez bien voulu, par votre lettre du 19 janvier m'informer que dans son Assemblée générale du 5 janvier 1930, la Société française des Electriciens m'avait, à l'unanimité de 617 voix, élu Président d'Honneur de la Société.

« Je n'ai pas besoin de vous dire combien j'ai été ému et honoré de cette exceptionnelle marque d'estime qui est pour moi une précieuse preuve de la sympathie et de l'affection de mes Collègues. Cette sympathie et cette affection je les avais déjà rencontrées en maintes circonstances; elles revêtent aujourd'hui une forme collective qui leur donne à mes yeux une valeur encore plus grande. Si, depuis trente-cinq ans, j'ai consacré tous mes efforts et toute mon activité aux fondations de la Société française des Electriciens, j'en ai toujours trouvé la récompense journalière dans l'intime conviction que j'avais de faire œuvre utile et désintéressée. La manifestation actuelle est la marque la plus éclatante de la justesse de ces sentiments intimes : voulez-vous en exprimer à nos collègues ma profonde reconnaissance.

« Veuillez agréer, Monsieur le Président, l'assurance de mes sentiments bien affectueusement dévoués.

Signé : P. JANET.



## II. — Le Jubilé de l'Electrotechnischer Verein

L'Elektrotechnischer Verein a fêté en janvier dernier le cinquantième anniversaire de sa fondation. A cette occasion, cette Société a nommé un certain nombre de correspondants étrangers ; elle a offert ce titre, pour la France, à MM Janet et Boucherot qui ont accepté. M. Janet n'ayant pu aller lui-même aux fêtes organisées à Berlin, M. Boucherot y est allé seul. Il y a représenté la Société française des Electriciens. Voici un résumé de ces fêtes.

Le 24 janvier 1930, à 14 heures, eut lieu à la Salle Krolls — place de la République — une cérémonie officielle qui groupa quelques centaines des personnalités les plus marquantes de l'Electrotechnique allemande et un grand nombre d'étrangers ; les pays suivants étaient représentés par un ou plusieurs de leurs nationaux : Etats-Unis d'Amérique, Argentine, Canada, Chine, Danemark, Angleterre, France, Italie, Japon, Hollande, Norvège, Autriche, Pologne Roumanie, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie et Ukraine. Le Ministre von Sydow ouvrit la séance et le Président K. W. Wagner prononça un discours sur l'Electrotechnique allemande ; il remit un livre d'or au Professeur Görges. Prirent ensuite la parole le Ministre des Postes, C. F. von Siemens, le bourgmestre Scholtz, le Professeur Nernst, le Professeur Drawe, les ingénieurs Petersen, Köhgen, Lange... pour rendre hommage aux fondateurs de la société, von Stephan et von Siemens, dont les bustes en bronze furent dévoilés. Puis, un certain nombre d'étrangers parlant l'allemand, parmi lesquels C. Feldmann, L. Lombardi, K. Sudzberger, Atkinson, etc... apportèrent les hommages cordiaux des étrangers

Le soir, dans la même salle, un grand banquet, suivi de bal, réunissait 1 500 à 2 000 convives.

Le lendemain 25 janvier furent présentées des communications techniques de Petersen, Thury, Orlich, Reichel, Feycrabend, Lüschen, V. Arco sur divers sujets. Le soir, une réunion plus intime avait lieu à l'Hôtel Esplanade.

Dimanche 26, visites de musées, au choix des visiteurs.

Lundi 27 et mardi 28, visites d'usines et de laboratoires de recherches (Siemens, A.E.G., etc...) également au choix des visiteurs.

Les nombres cités plus haut sont suffisamment éloquents par eux-mêmes pour qu'il soit superflu d'insister sur la réussite de ces fêtes.

### III. — Congrès de Tokyo

Deux Congrès ont été tenus à Tokyo en 1929 : un congrès des Ingénieurs et une réunion partielle de la Conférence Mondiale de l'Energie.

La Société Française des Electriciens s'était fait représenter à la Conférence par MM. G. CUVILLIER, Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique et de l'E.S.E., diplômé de l'Ecole des Langues Orientales Vivantes (Japonais), membre correspondant du Comité du Commerce Extérieur, membre de l'Asiatic Society of Japan ; PAHIN, Licencié ès-sciences, ingénieur des Arts et Manufactures, directeur de la Revue Universelle des Transports ; PERNOT, Ingénieur à la Compagnie Grand-Ducal d'Electricité.

Sur huit rapports émanant d'Ingénieurs français, quatre ont été envoyés par nos membres <sup>(1)</sup>.

SECTION A. — Utilisation des sources d'énergie. — *L'utilisation rationnelle de la puissance du vent*, M. L. Neu <sup>(2)</sup>.

SECTION B. — Transport et distribution de l'énergie électrique — *la foudre et les lignes électriques*, M. C. Dauzère <sup>(3)</sup>.

SECTION C. — L'énergie dans les transports — *la traction à accumulateurs dans les mines considérée comme un problème de rationalisation industrielle* M. Mille.

SECTION D. — Amélioration du rendement dans la production de l'énergie — *application éventuelle des machines frigorifiques et des gaz à haute pression pour augmenter la sécurité de l'exploitation des Centrales et des postes de transformateurs*, M. L. Neu <sup>(4)</sup>.

M. Neu, dans son premier rapport, rappela le projet consistant à installer à Leipzig, un moulin à vent au sommet d'une haute tour. Il prédit la réalisation de moulins établis sur le principe de l'effet

(1) La répartition par nationalités était la suivante : travaux Japonais, 48. — Allemands, 10. — Anglais, 13. — Russes, 3. — Danois, 4. — Italiens, 2. — Français, 8. — Belges, 1. — Suisses, 5. — Suédois, 11. — Tchécoslovaques, 2. — Américains, 11. — Soit au total, 118.

(2) Voir bulletin de la Société Française des Electriciens, n° 94, tome IX, juin 1929, p. 570.

(3) Voir bulletin de la Société Française des Electriciens, n° 94, tome IX, juin 1929, p. 575.

(4) Voir bulletin de la Société Française des Electriciens, n° 93, tome IX, mai 1929, p. 542.

Magnus, qui a permis de réaliser avec succès des bateaux sans voiles à propulsion par le vent du type Flettner. Il rappelle qu'il avait lui-même breveté l'utilisation de dynamos à courant continu et à intensité constante actionnées par des moteurs à vent et dont la tension aux bornes était proportionnelle au cube de la vitesse de rotation.

M. T. Motooka signale à ce propos l'existence au Japon d'une installation permettant de contrôler la vitesse du vent et conclut que l'emmagasinement de l'énergie serait mieux réalisé par réservoirs d'eau que par accumulateurs.

Le rapport de M. Dauzère souleva un vif intérêt en signalant l'influence sur la formation des orages, de la constitution géologique du sol et de la prédominance des ions négatifs dans l'atmosphère.

M. Mille exposa que l'introduction dans les mines de locomotives électriques constitue un élément important de la rationalisation industrielle. L'emploi des accumulateurs permet de supprimer les fils de trolley et les étincelles, d'assurer sans recharge, un trajet supérieur à celui fourni par les machines à air comprimé et d'obtenir un meilleur rendement.

M. L. Neu développe enfin la méthode qu'il a préconisée ici même de réfrigération des génératrices et des transformateurs par l'emploi de machines frigorifiques. On augmenterait ainsi la sécurité de marche et la capacité de surcharge des appareils.

L'emploi dans les transformateurs et les disjoncteurs de gaz comprimés, refroidis au besoin, lui paraît être aussi à recommander pour supprimer les dangers d'incendie, résultant de l'emploi de l'huile.

---

# TRAVAUX DES SECTIONS

---

## SOMMAIRE

- 1<sup>re</sup> SECTION. — L'artifice de l'accrocheur et de la cage folle (MM. PESTARINI et LE MONNIER), p. 384. — Méthode symbolique pour l'étude des phénomènes transitoires dans les machines polyphasées (M. DARRIEUS), p. 400. — Auto-amorçage d'un moteur asynchrone fermé sur une capacité (M. LIÉNART), p. 406.
- 2<sup>e</sup> SECTION. — Fin de la communication sur l'éclairage public par l'électricité en France (M. LESOUPLE), p. 414. — Le chauffage par machine frigorifique (communication par M. DARMOIS d'un travail de M. HALDANE, p. 415.
- 3<sup>e</sup> SECTION. — Recuits partiels par induction (Colonel VIRY), p. 416. — L'accumulateur léger Pouchain (M. ANTOINE), p. 427.
- 4<sup>e</sup> SECTION. — Protection des installations par éclateurs court-circuiteurs à disques très rapprochés (Colonel VIRY), p. 448. — Redresseurs à mercure de la Société Siemens (M. ROY), p. 452.
- 5<sup>e</sup> SECTION. — Le système de téléphonie automatique de la Compagnie des Téléphones Thomson Houston (M. GOHOREL), p. 453. — Courroies transporteuses à sélection multiple et leurs applications dans les centraux télégraphiques et téléphoniques (M. Lucien KRIEGER), p. 454.

## 1<sup>re</sup> SECTION. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

Président : M. Paul GIRAULT

SÉANCES DES 15 NOVEMBRE ET 11 DÉCEMBRE 1929. — I. — M. PESTARINI présente la note suivante sur *l'artifice de l'accrocheur et de la cage folle* (1).

J'ai eu l'occasion de proposer l'application du moteur synchrone dit à double alimentation. Son stator et son rotor sont alimentés par le même réseau alternatif, connectés entre eux soit en parallèle soit en série; le rotor est ainsi bobiné que le champ tournant qu'il créerait s'il était fixe, a le sens contraire de celui du stator. La vitesse de synchronisme du moteur à double alimentation est donc double de la vitesse de rotation du champ tournant créé par le stator seul.

---

(1) L'Elettrotecnica du 5 novembre 1929 contient les lignes essentielles de cette communication.

Un tel moteur est difficile à amener au synchronisme, comme déjà M. DE PISTOYE l'a dit <sup>(2)</sup> ; j'ai résolu pratiquement la question du démarrage de la manière suivante : on démarre d'abord le moteur à double alimentation en alimentant le stator seulement et en insérant un rhéostat de démarrage ordinaire dans le rotor ; on amène ainsi le rotor à une vitesse qui est sensiblement la moitié de sa vitesse de synchronisme. On démarre alors un petit moteur asynchrone auxiliaire qu'on appellera « accrocheur » ; ce dernier est de construction ordinaire à rotor bobiné avec le même nombre de phases que le stator

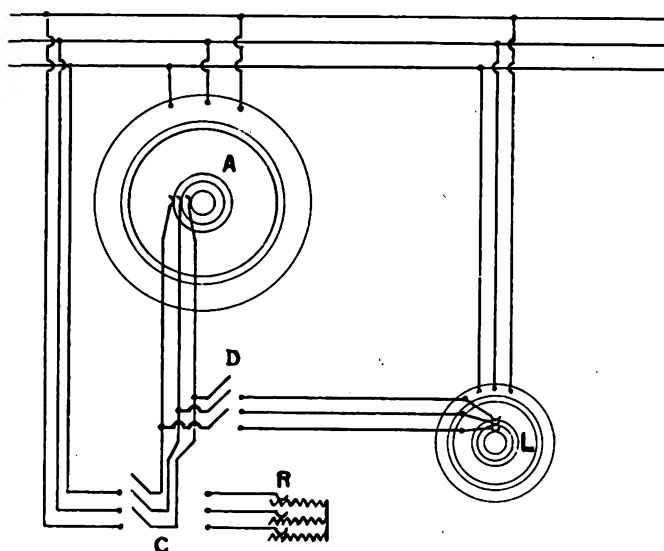


Figure 1.

et avec un rapport de transformation voisin de l'unité. On accouple alors les deux rotors en série l'un sur l'autre comme l'indique la figure 1 où L est l'accrocheur et A le moteur, et l'on freine graduellement par un moyen quelconque (un frein à bande est indiqué sur la figure 1) jusqu'à l'arrêt complet du rotor de l'accrocheur ; le rotor du moteur A accélère et atteint aisément sa vitesse de synchronisme. Grâce à un repère prévu sur l'accrocheur on amène les tensions rotoriques en phases avec celles du stator et l'on connecte alors le rotor de A au réseau et l'on déconnecte l'accrocheur. Le démarrage est ainsi accompli très aisément à tout couple dont le moteur A soit capable

(2) Voir la Technique Moderne de 1928.

en marche normale. L'accrocheur ne devant fonctionner que pendant le démarrage est très réduit et rudimentaire de construction. Sa faible importance devient encore plus manifeste quand le moteur à double alimentation est puissant et à grand nombre de pôles, car l'accrocheur peut avoir toujours rien que deux ou quatre pôles. Une fois accroché le moteur à double alimentation s'est montré en plateforme très peu stable. Il n'était capable que d'une puissance bien plus faible que celle qu'on attendait de lui, et des à-coups peu importants, par exemple des battements un peu forts de la courroie le décrochaient.

Nous allons examiner la forme du couple de ce moteur, soit  $\omega$  la pulsation du courant du réseau, supposons l'enroulement bipolaire pour la simplicité, et soit  $\Omega$  la vitesse du rotor en radians par seconde. La vitesse du synchronisme  $\Omega_1$  sera :

$$\Omega_1 = 2\omega$$

le sens positif des vitesses des champs tournants et de la rotation des masses sera le même, comme aussi celui des pulsations d'après le sens de rotation des champs tournants que ces pulsations créent.

Supposons les tensions des réseaux sinusoïdales et telle aussi la répartition des ampères-tours des bobinages le long de l'entrefer. Alors les courants statoriques  $i$  et rotoriques  $y$  seront aussi sinusoïdaux au synchronisme

$$\Omega = \Omega_1$$

et le couple pourra être mis sous la forme :  $C = K I_1 H_1 \sin \alpha$  où  $K$  est une constante de construction,  $I_1$  et  $H_1$  les amplitudes des courants du stator et du rotor et  $\alpha$  l'angle que le flux dû au rotor fait avec le flux dû au stator.

Au point de vue de la résistance offerte aux à-coups, le moteur à double alimentation doit être comparé aux moteurs synchrones excités avec du courant continu ayant un très faible entrefer, excités juste assez pour aimanter le circuit magnétique, dépourvus de l'amortisseur Leblanc, mais dont le circuit à courant continu aurait une très grande résistance, et le fer des inducteurs serait feuilleté. En fait un tel moteur synchrone présenterait une résistance bien faible aux à-coups.

Examinons la forme du couple à double alimentation en régime troublé : pour mieux opérer la décomposition du couple nous examinerons le cas plus général où le stator du moteur à double alimentation est alimenté par un alternateur de fréquence  $\omega_1$  et le rotor par un autre alternateur de fréquence  $\omega_2$ , comme la figure 2 l'indique.

Supposons que la vitesse  $\Omega$  du moteur à double alimentation se soit écartée pour une cause quelconque, un à-coup par exemple, de la valeur  $\Omega_1$  correspondante au synchronisme, et soit

$$\Omega_1 + \chi = \Omega.$$

Aux courants de pulsation initiale  $\omega_1$  et  $w_1$  s'en superposeront d'autres dus à l'action réciproque du stator et du rotor et nous aurons pour le stator le courant  $i$  de la forme

$$i \approx I_1 \sin (\omega_1 t - \varphi_1) + I_2 \sin [(\omega_1 + \chi) t - \varphi_2] \quad (1)$$

et pour le rotor le courant  $y$  de la forme :

$$y = H_1 \sin (w_1 t - \theta_1) + H_2 \sin [(w_1 - \chi) t - \theta_2] \quad (2)$$

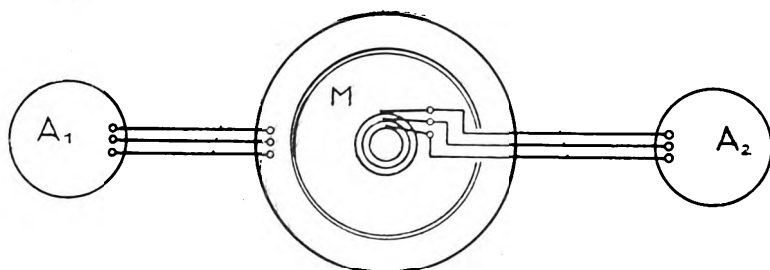


Figure 2..

De l'action mutuelle de ces courants naîtra un couple décomposable en quatre couples élémentaires comme suit :

$$C = KI_1 H_1 \sin \alpha_{11} + KI_1 H_2 \sin \alpha_{12} + KI_2 H_1 \sin \alpha_{21} + KI_2 H_2 \sin \alpha_{22} \quad (3)$$

où  $\alpha_{11}$  est l'angle formé par le flux sinusoïdal tournant créé par le courant statorique  $I_1 \sin (\omega_1 t - \varphi_1)$  avec le flux sinusoïdal tournant créé par le courant rotorique

$$H_1 (w_1 t - \theta_1),$$

et où  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$  et  $\alpha_{22}$  ont une signification analogue.

Il est facile de voir que  $\alpha_{11}$  est variable avec le temps, que  $\alpha_{12}$  et  $\alpha_{21}$  sont constants au contraire et que  $\alpha_{22}$ , enfin, est variable avec le temps, et l'on consentira aisément à appeler le premier terme du second membre de la formule (3) : couple élémentaire synchrone ; le deuxième et le troisième : couples élémentaires asynchrones ; enfin le dernier : couple élémentaire pseudosynchrone, car ce dernier comporte bien un angle  $\alpha_{22}$  qui n'est pas constant, qui est alternatif d'une fréquence qui tend vers 0 quand  $\Omega$  tend vers  $\Omega_1$  tout comme l'angle  $\alpha_{11}$  du couple syn-

chrone, mais il s'évanouit pour  $\Omega = \Omega_1$ , contrairement à ce qui arrive pour le couple élémentaire synchrone.

Les couples élémentaires asynchrones sont très faibles à cause de la grande impédance de leurs circuits secondaires respectifs, puisque ces circuits secondaires sont constitués l'un par le stator du moteur à double alimentation et par l'alternateur  $A_1$ , et l'autre par le rotor du moteur à double alimentation et l'alternateur  $A_2$  <sup>(3)</sup>.

Le couple élémentaire pseudosynchrone est encore plus faible. Donc pour un premier examen du régime transitoire à la suite d'un à-coup, on pourra s'arrêter au premier couple élémentaire. Si alors on désigne

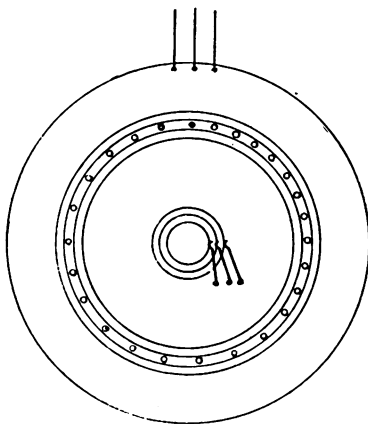


Figure 3.

par  $m$  le moment d'inertie du rotor du moteur à double alimentation et de celui qui lui est solidaire, on aura en prenant le premier terme seulement du développement de  $\sin \alpha_{11}$  :

$$m \frac{d^2 \alpha_{11}}{dt^2} + A \alpha_{11} = 0 \quad (4)$$

où  $A$  est une constante ; l'on voit de suite qu'il y a un mouvement oscillatoire non amorti.

Dans l'entrefer de notre moteur à double alimentation, disposons une cage d'écureuil folle sur l'arbre : pour avoir un bon facteur de puissance pendant le fonctionnement normal, remplissons de fer les intervalles entre les barres (voir fig. 3). Pendant le fonctionnement

(3) Il se peut toutefois que ces impédances soient bien réduites dans certains cas, par exemple quand il y a à la place de l'alternateur  $A$  un réseau avec un grand nombre d'appareils branchés, ou mieux encore quand il y a un alternateur à collecteur qui n'intervient alors que par la résistance de son induit.



normal la cage folle tournera à la vitesse  $Z = \omega_1$ , elle ne sera le siège d'aucun courant <sup>(4)</sup>, et n'aura aucune influence sur le fonctionnement.

Mais aussitôt que le régime normal est troublé, la cage folle intervient énergiquement. Supposons encore la vitesse du rotor

$$\omega = \omega_1 + \chi$$

celle de la cage  $Z = \omega_1 + \psi$ ; les courants statoriques et rotoriques sont encore de la forme (1) et (2) respectivement, la cage folle ne créant aucune pulsation nouvelle de courant et modifiant seulement les amplitudes et phases et l'on aura :

$$\begin{aligned} i' &= I_1 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + I'_2 \sin[(\omega_1 + \chi)t - \varphi'_2] \\ \eta' &= H_1 \sin(\omega_1 t - \theta_1) + H'_2 \sin[(\omega_1 + \chi)t - \theta'_2] \end{aligned} \quad (5)$$

soit  $y$  le courant dans la cage folle, il sera de la forme :

$$\begin{aligned} y &= Y_{10} \sin(-\psi t - \beta_{10}) + Y_{01} \sin[(\chi - \psi)t - \beta_{01}] \\ &\quad + Y_{20} \sin[(\chi - \psi)t - \beta_{20}] + Y_{02} \sin(-\psi t - \beta_{02}) \quad (6) \\ &= Y_1 \sin(-\psi t - \beta_1) + Y_2 \sin[(\chi - \psi)t - \beta_2]. \quad (6 \text{ bis}) \end{aligned}$$

Les indices doubles dans la formule (6) indiquent la genèse des courants, l'indice différent de 0 étant relatif à l'indice du courant primaire statorique ou rotorique et la position du zéro à droite ou à gauche indiquant qu'il s'agit du courant statorique ou rotorique respectivement.

Le couple sur le rotor a une expression plus compliquée que la formule (3) et pour simplifier nous examinerons d'abord le couple appliqué sur la cage folle. Soit  $C_{FS}$  celui dû à l'action statorique; il sera de la forme :

$$C_{FS} = k Y_1 I_1 \sin \gamma_{11} + k Y_1 I_2 \sin \gamma_{12} + k Y_2 I_1 \sin \gamma_{21} + k Y_2 I_2 \sin \gamma_{22} \quad (7)$$

où  $k$  est une constante de construction et  $\gamma_{11}$  est l'angle formé par l'axe du champ tournant créé par le courant  $Y_1 \sin(-\psi t - \beta_1)$  de la cage folle et l'axe du champ tournant créé par le courant

$$I_1 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \text{ du stator,}$$

et où

$$\gamma_{12} \quad \gamma_{21} \quad \gamma_{22}$$

ont une signification analogue.

On reconnaît facilement aux couples élémentaires qui figurent à la formule (7) leur caractère asynchrone et pseudo-synchrone.

---

(4) Elle étouffera les harmoniques du champ éventuel.

Le couple  $C_{FR}$  appliqué sur la cage folle par le rotor a une forme analogue à (7). On peut admettre comme négligeable l'inertie de la cage folle et l'on aura ainsi :

$$C_{FS} + C_{FR} = 0. \quad (8)$$

Nous pouvons maintenant écrire le couple  $C'$  sur le rotor sous la forme :

$$C' = KI_1 H_1 \sin \alpha_{11} + KI_1 H'_2 \sin \alpha'_{11} + KI'_2 H_1 \sin \alpha'_{21} + KI'_2 H'_2 \sin \alpha_{22} + C_{FS}. \quad (9)$$

La réaction entière du couple rotorique se trouve donc sur le stator, la cage folle ne servant que d'un support intermédiaire d'ancrage d'une partie du couple résultant.

On reconnaît aisément que les couples élémentaires asynchrones et pseudosynchrones représentés par le deuxième, troisième et quatrième terme du second membre de la formule (9) sont bien plus réduits que les homologues dans la formule (3) sans cage folle. Par contre le terme  $C_{FS}$  dû à la cage folle, introduit un couple asynchrone très important de même ordre de grandeur que le couple normal synchrone, et un couple pseudosynchrone.

Etablir l'équation du régime variable serait ici encore plus laborieux ; nous tirerons la conséquence pratique la plus importante en nous contentant d'une approximation : négligeons les couples pseudosynchrones en général faibles, les couples asynchrones très faibles du 2° et 3° terme du second membre de la formule (9), et retenons d'une part le couple synchrone, et d'autre part le couple asynchrone dû à la cage folle. Ce dernier est, pour des faibles glissements, proportionnel à ce glissement qui, par tour, est proportionnel à la dérivée de l'angle  $\alpha_{11}$ , de sorte que nous pourrions écrire l'équation du régime variable, en négligeant toujours l'inertie de la cage folle, de la manière suivante :

$$m \frac{d^2 \alpha_{11}}{dt^2} + B \frac{d\alpha_{11}}{dt} + A \alpha_{11} = 0 \quad (10)$$

où A et B sont des constantes ; la solution de la formule (10) indique un mouvement amorti, très énergiquement amorti si la résistance de la cage folle est faible.

Le couple asynchrone que la cage folle introduit est bien plus puissant que celui de l'amortisseur Leblanc dans les moteurs synchrones à excitation à courant continu, et le moteur à double alimentation muni d'une cage folle acquiert une grande stabilité de fonctionnement

et devient capable d'affronter avec aisance les violents à-coups sans décrocher.

La cage folle que nous avons construite pour le moteur à double alimentation par le même réseau, était de la forme ordinaire (voir fig. 3), mais elle peut prendre une forme encore plus simple : celle par exemple d'un cylindre mince de fer massif comme l'indique la

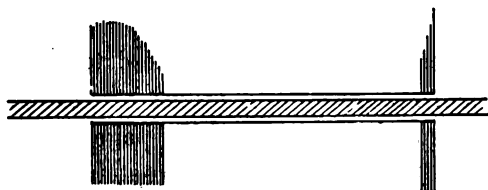


Figure 4.

fig. 4, ou, si l'on veut, recouvert d'une couche de cuivre sur une ou deux faces comme l'indique la fig. 5. La construction en fer massif se prêterait bien à l'adaptation sur la cage folle d'un enroulement inducteur excité par du courant continu et permettrait ainsi de relever le facteur de puissance.

Dans le cas d'un moteur à double alimentation installé par un client désireux d'obtenir une vitesse variable en connectant le stator au

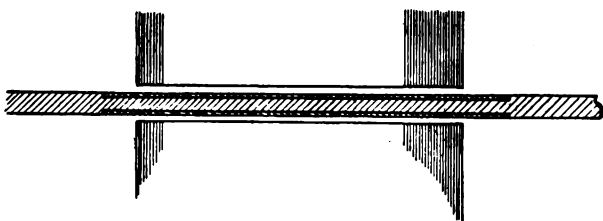


Figure 5.

réseau et le rotor à un alternateur auxiliaire installé chez ce client même, le relevage du facteur de puissance peut s'obtenir tout simplement par le réglage convenable de l'excitation de l'alternateur du client.

Enfin pour les petites puissances on peut demander à la cage folle d'opérer le démarrage sans avoir recours à l'accrocheur.

## II. — Discussion de la note de M. PESTARINI.

M. le Président donne lecture de la lettre suivante de M. BOUCHE ROT :

« Je regrette d'avoir l'air de réclamer contre M. Pestarini : il sait ce que je pense de lui personnellement.

« La machine présentée est celle que j'ai brevetée le 6 novembre 1894 (br. français 239 332, br. allemand 92 859), sous le nom de « *alternateur à induits auto-inducteurs* ». Je crois que ce serait là le bon nom à donner.

« Elle a été proposée aussi vers la même date par Ferrario en Italie, mais comme moteur seulement. J'ai réalisé en 1894 un type de 20 kW : c'est celui représenté en photographie, page 92 du Bulletin de la Société de février 1898. C'est un des alternateurs auto-exciteurs, que j'ai présentés à cette séance.

« La disposition à *cage folle* est décrite dans ce brevet français 239 332, dessiné dans un certificat d'addition du 20 avril 1895, et dans plusieurs brevets étrangers. (La cage folle pour moteurs asynchrones est de M. Leblanc.)

« Le certificat d'addition ci-dessus revendique aussi la même machine à courant continu (2 induits, 2 collecteurs, etc...). »

M. LE MONNIER rend hommage à M. PESTARINI pour l'ingéniosité du système de démarrage de son moteur et ajoute : Dans les premiers mois de l'année 1921, nous avons fait l'essai à la Compagnie Générale Electrique, d'un moteur synchrone triphasé dont le rotor était excité par le même réseau que le stator et qui fonctionnait par suite à une vitesse double de la vitesse du synchronisme de la même machine excitée en courant continu. Il s'agissait d'une machine à 6 pôles munie d'enroulements ayant exactement le même nombre de spires au stator et au rotor. Cette machine était capable de fournir en moteur synchrone, alimentée en courants triphasés, 200 v, 50 p:s, une puissance de 30 ch à 1 000 t:mn sous  $\cos \varphi = 1$ . Alimentée par du courant triphasé à 90 V 25 p: s au stator comme au rotor, cette machine a pu absorber, *sans manifester la moindre défaillance*, une puissance de 24 kW, sous un facteur de puissance de 0,927 et avec un rendement de 90,2 pour cent. Elle fournissait donc dans ces conditions, à la même vitesse que précédemment de 1 000 t:mn, un couple voisin du couple envisagé dans le fonctionnement précédent.

Il semble donc que le phénomène observé par M. PESTARINI n'ait pas un caractère général et ne mérite pas d'être expliqué comme il l'a

fait. Pour ma part, je serais assez tenté de croire qu'il est tombé sur un cas particulier dans lequel il s'est heurté à des difficultés analogues à celles que l'on rencontre dans les moteurs asynchrones enclins au rampage. On admet que ces difficultés sont dues à la présence d'harmoniques du flux principal induisant dans les enroulements des forces électro-motrices de même fréquence que la force électro-motrice fondamentale, tout en balayant l'entrefer à des vitesses différentes de la vitesse du champ fondamental. Dans des conditions favorables, certains de ces harmoniques peuvent produire un couple de signe contraire au couple dû au fondamental.

Cette explication m'a été suggérée par l'hypothèse que fait M. PESTARINI sur la nature des tensions et la répartition des ampère-tours des bobinages le long de l'entrefer. En admettant, comme il le fait, que ces tensions et répartitions sont parfaitement sinusoïdales, on s'écarte plus ou moins de la réalité suivant la construction de la machine que l'on essaie.

La présence de la cage folle de M. PESTARINI explique aisément la disparition des décrochages de son moteur d'essai par son action sur les harmoniques de champ émanant tant du stator que du rotor.

D'autre part, la comparaison que fait M. PESTARINI entre les moteurs synchrones excités en courant continu et le moteur synchrone à double alimentation, me semble très imparfaite. Il envisage, en effet, un « moteur synchrone à faible entrefer et excité juste assez pour aimanter le circuit magnétique », mais il omet d'insister sur ce que ce courant d'excitation très faible restera *constant* lorsqu'on soumettra le moteur à une variation brusque de charge. Dans ce cas particulier, *et dans ce cas seulement*, la conclusion de M. PESTARINI est exacte : un tel moteur synchrone présentera une résistance très faible au décrochage.

Le fonctionnement du moteur à double alimentation n'est nullement comparable au précédent, car lors d'une variation de charge, le courant va varier dans les deux enroulements dont les actions électromagnétiques réciproques engendrent le couple moteur. J'estime que le moteur à double alimentation présente plus d'analogie avec le moteur synchrone ou asynchrone synchronisé, *auto-exciteur* dans lequel une variation de charge provoque une variation simultanée et sensiblement proportionnelle de courant dans les deux enroulements,

en même temps qu'une variation de l'angle de décalage entre les flux émis par ces deux enroulements.

Or l'expérience montre que ce moteur supporte parfaitement, sans la moindre défaillance, les variations de charge comme le moteur à double alimentation auquel j'ai fait allusion en commençant.

M. PESTARINI reconnaît volontiers que la cage folle élimine les harmoniques du champ et qu'elle joue déjà à cet égard un rôle bien-faisant, mais il conserve l'opinion que son effet stabilisateur tient à des causes plus profondes.

M. DARIEUS fait la remarque ci-après : Cette machine est caractérisée par un couple de décrochage très élevé, puisqu'il est possible de démontrer que la puissance dans la position de court-circuit et la puissance maximum sont environ quatre fois plus grandes que pour le même moteur fonctionnant en asynchrone avec le rotor en court-circuit, ce qui correspond, puisque la vitesse est le double de la vitesse de synchronisme, à un couple maximum de deux fois le couple du moteur ordinaire. De ce point de vue le moteur à double alimentation est à assimiler à un alternateur synchrone relié à un réseau de puissance infinie, et dont un compoundage instantané permettrait de maintenir invariable le flux résultant total, embrassé par les inducteurs. Dans ces conditions, le couple synchronisant est d'autant plus élevé que les fuites totales entre le stator et le rotor sont plus faibles.

En effet, l'alimentation en parallèle sous tension  $U$  donnée et à fréquence  $\omega$  du stator et du rotor, équivaut, aux pertes près dues aux résistances, à imposer aux flux embrassés par chacun de ces circuits la même valeur efficace invariable  $\frac{U}{\omega}$

Or l'expression de l'énergie électromagnétique du système en fonction non plus des courants  $I_1$ ,  $I_2$  résultants au stator et au rotor, mais des flux résultants

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + M I_2, \quad \Phi_2 = M I_1 + L_2 I_2$$

correspondants, est de la forme : (en posant  $N_1 = \sigma L_1$ ,  $N_2 = \sigma L_2$ )

$$W = \frac{1}{2} \frac{\Phi_1^2}{N_1} + \frac{1}{2} \frac{\Phi_2^2}{N_2} - \left( \frac{1 - \sigma}{\sigma M} \right) \Phi_1 \Phi_2 \cos \alpha$$

où  $\alpha$  représente le déphasage entre les directions du flux résultant du stator et du rotor (fig. 6).

Comme tout déplacement virtuel à flux constants ne met en jeu aucune f.é.m. d'induction ni par conséquent aucun apport d'énergie par les bornes, les forces électro-dynamiques entre circuits dérivent exclusivement de l'énergie magnétique accumulée dans le système et qui se comporte ainsi comme si elle était de nature potentielle, de sorte que l'expression du couple se réduit à la forme très simple et physiquement intuitive <sup>(1)</sup> :

$$C = - \frac{\delta W}{\delta \alpha} = - \left( \frac{1 - \sigma}{\sigma M} \right) \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha$$

qui met en évidence que lorsque le coefficient de dispersion  $\sigma$  est faible, le couple maximum lui est inversement proportionnel.

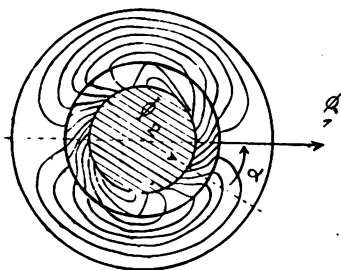


Figure 6.

La manière la plus directe d'établir le diagramme de ce moteur consiste à envisager son fonctionnement normal comme résultant de la superposition de deux régimes correspondants respectivement à l'alimentation de l'un des éléments du moteur et à la mise en court-circuit de l'autre.

Comme chacun de ces deux régimes est pleinement défini par la tension appliquée, la superposition ne fait intervenir d'autre variable que l'angle  $\alpha$  qui correspond au décalage dans l'espace des tensions appliquées au stator et au rotor ; et le courant total absorbé, somme de deux courants primaires déphasés d'à peu près  $\frac{\pi}{2}$  en arrière de la tension et de deux courants induits ou secondaires également constants mais décalés ensemble de l'angle  $\alpha$ , décrira donc un cercle ayant

(1) L'expression du couple est au contraire  $+\frac{\delta W}{\delta \alpha}$  si  $W$  est exprimé non plus en fonction des flux (quantités de mouvement électrocinétiques) mais, comme d'ordinaire, en fonction des courants (vitesses).

pour centre l'extrémité de la somme des deux premiers courants et pour rayon la somme des deux derniers.

Le courant minimum ou magnétisant total, et le courant maximum ou de court-circuit, seront donc respectivement avec le signe — et le signe +, en négligeant les résistances (fig. 7) :

$$\left. \begin{matrix} I_m \\ I_{cc} \end{matrix} \right\} = U \left( \underbrace{\frac{1}{N_1} \mp \frac{1}{N_2} \frac{M}{L_1}}_{\text{stator}} + \underbrace{\frac{1}{N_2} \mp \frac{1}{N_1} \frac{M}{L_2}}_{\text{rotor}} \right).$$

Pour un coefficient global de dispersion  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$  donné, le rapport de ces deux courants extrêmes sera évidemment maximum ou

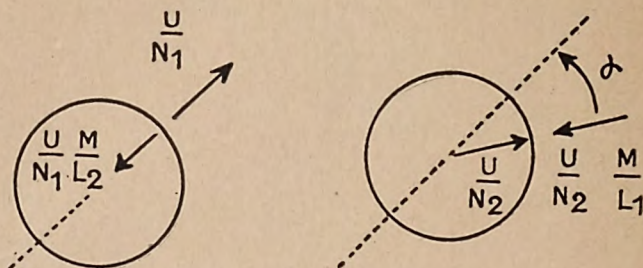


Figure 7.

optimum, si  $L_1 = L_2 = L$ , soit  $N_1 = N_2 = N = \sigma L$ , c'est-à-dire si les bobines du stator et du rotor sont semblables, de sorte que :

$$\left. \begin{matrix} I_m \\ I_{cc} \end{matrix} \right\} = \frac{U}{L} \left( \frac{2}{\sigma} \right) \mp \frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sigma} = \begin{cases} \frac{U}{L} \\ \frac{4U}{N} \end{cases}$$

Le rapport des courants à vide et de court-circuit est donc égal à  $\frac{\sigma}{4}$  au lieu de  $\sigma$  dans le moteur normal, comme permettait de prévoir la considération de l'énergie magnétisante, qui gardant à peu près à vide sa valeur pour une même tension appliquée lorsque les ampère-tours magnétisants sont partagés par moitié entre le stator et le rotor, est par contre en court-circuit quatre fois plus grande que pour le moteur normal, puisque l'alimentation simultanée du rotor, contraint deux flux égaux au flux normal  $\frac{U}{\omega}$  à se partager les mêmes fuites totales.



La stabilité statique du moteur à double alimentation est donc très grande ; et les difficultés qui ont conduit M. PESTARINI à recourir à l'artifice de la cage folle, sont dues, non à l'insuffisance du couple synchronisant, mais à une instabilité dynamique essentielle de ce genre de machine, qui s'apparente étroitement à l'amortissement négatif dont M. BOUCHEROT a démontré l'existence en 1913 dans les alternateurs dépourvus d'amortisseurs, lorsqu'il est tenu compte de la résistance d'induit.

Supposons en effet que le rotor oscille autour de sa position d'équilibre stable correspondant au couple moyen transmis. Pour chacun des régimes composants considérés ci-dessus, le glissement oscillera de part et d'autre de la valeur  $-1$  correspondant au double du synchronisme, avec pour le cas du stator alimenté un point de fonction-

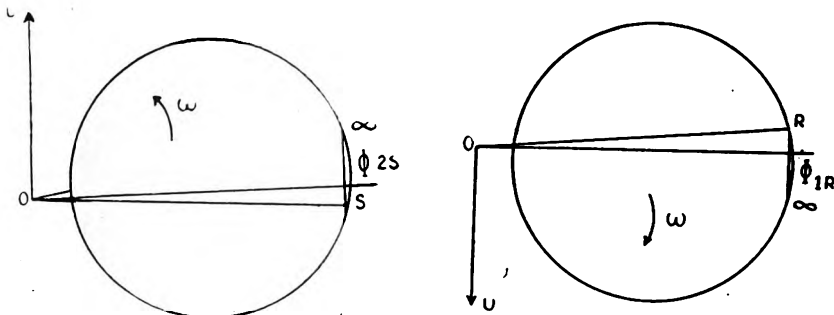


Figure 8.

nement en S sur le diagramme du cercle ordinaire et, pour le cas du rotor alimenté, un point figuratif en R sur un diagramme semblable mais retourné, puisque l'ordre de succession des phases y est inverse (fig. 8).

Lorsque le glissement est momentanément plus grand que  $-1$  en valeur absolue, les points figuratifs S et R se rapprochent du point  $\infty$  correspondant au glissement infini.

Corrélativement les segments  $\infty S$  et  $\infty R$  qui représentent approximativement en phase le flux réel à travers l'élément rotor ou stator, en court-circuit, diminuent ainsi que leur produit par le flux à peu près constant et en quadrature qui traverse le circuit, stator ou rotor, alimenté sous la tension U. Le couple résistant diminue donc lorsque le glissement croît, ce qui correspond à la forme bien connue de la courbe du couple du moteur asynchrone et à la variation sensiblement

en raison inverse du glissement qu'exige, à partir du moment où le courant induit est à peu près constant, la constance des pertes Joule correspondantes (fig. 9). Or le couple résultant en charge, proportionnel au produit vectoriel

$$[(\Phi_{1S} + \Phi_{1R}), (\Phi_{2S} + \Phi_{2R})] = (\Phi_{1S}\Phi_{2S}) + (\Phi_{1R}\Phi_{2R}) + (\Phi_{1S}\Phi_{2R}) + (\Phi_{1R}\Phi_{2S})$$

(dans lesquels les indices S ou R désignent l'élément stator ou rotor mis sous tension), ne comprend, outre les deux couples asynchrones ci-dessus qui en forment les deux premiers termes, que deux autres dont le dernier  $(\Phi_{1R}\Phi_{2S})$  est du deuxième ordre et négligeable en raison de la petitesse du flux dans le bobinage en court-circuit, tandis que le troisième  $(\Phi_{1S}\Phi_{2R})$ , qui donne la presque totalité du couple synchrone, et dépend essentiellement du retard de phase du rotor, est par contre

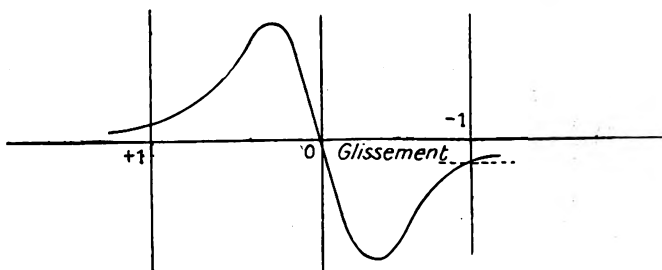


Figure 9.

presque indépendant du glissement instantané. En définitive, le signe de la variation du couple total en fonction du glissement est celui que font prévaloir les deux termes asynchrones existants déjà dans les régimes composants en court-circuit, c'est-à-dire qu'il correspond à un amortissement négatif, quelle que soit la charge.

Le moindre écart inévitable à partir de la position d'équilibre du rotor, déterminera donc sous l'influence du couple synchronisant ou élastique, une oscillation dont l'amplitude ira en croissant indéfiniment jusqu'au décrochage (fig. 10). Cet amortissement négatif pourra d'ailleurs être le plus souvent masqué par un amortissement proprement dit ou positif, plus grand, existant extérieurement, par exemple dans la caractéristique de la charge entraînée (croissance assez rapide du couple résistant en fonction de la vitesse), mais il pourra réapparaître comme cela paraît avoir été le cas dans les essais de M. PESTARINI lors d'un à-coup excessif, si l'accouplement (courroie) n'est sus-

ceptible de transmettre qu'une valeur limitée du courant instantané.

M. PESTARINI ajoute : La présence de la cage folle dans le moteur synchrone « à induits auto-inducteurs », tel est le nom donné par son inventeur M. BOUCHEROT, augmente la stabilité de cette machine, par son effet amortisseur (particulièrement utile dans le cas d'amortissement « négatif » rappelé par M. DARRIEUS) et par le couple asynchrone qu'elle introduit lors d'une perturbation. Ce couple asynchrone, non seulement tend à ramener au synchronisme le rotor calé sur l'arbre, mais il augmente singulièrement l'angle de décalage possible le long duquel le rotor peut glisser sous l'action de l'à-coup sans

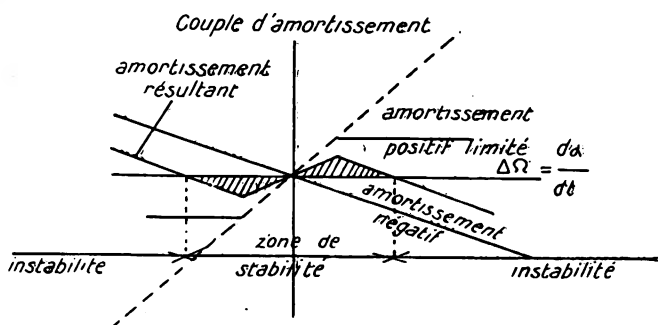


Figure 10.

perdre la faculté de s'accrocher tout seul à nouveau. Ce dernier avantage entraîne celui de pouvoir atteindre une vitesse angulaire assez basse et donc pouvoir opposer à l'à-coup une énergie importante sous forme de force vive. On se rend immédiatement compte que la cage folle appliquée aux moteurs à induits auto-inducteurs est bien plus efficace que la cage LEBLANC que portent les moteurs synchrones à inducteurs massifs et à pôles saillants.

La cage folle permettrait enfin le démarrage des petits moteurs à induits auto-inducteurs par simple insertion au réseau.

La lettre de M. BOUCHEROT nous renseigne sur la paternité de la cage folle et je rends ici hommage au Maître. Il me reste « l'accrocheur » et j'enregistre avec satisfaction que les Membres présents à la séance qui ont eu à s'occuper du problème du démarrage du moteur à induits auto-inducteurs l'aient apprécié.

II. — M. DARRIEUS présente la communication suivante sur une *méthode symbolique pour l'étude des phénomènes transitoires dans les machines polyphasées*.

L'étude la plus générale du fonctionnement des machines à courant alternatif, notamment celle des phénomènes transitoires, fait intervenir des coefficients d'inductance variables périodiquement. En se bornant par exemple au cas simplifié dans lequel le champ ou les bobinages sont sinusoïdaux pour l'une au moins des parties, stator ou rotor, de la machine, le coefficient d'induction mutuelle entre un circuit du rotor et un circuit du stator, est ainsi de la forme  $M \cos \Omega t$ .

De ce fait les équations différentielles du régime variable, quoique toujours linéaires, présentent des coefficients non plus constants mais périodiques. Le type de problèmes correspondant, qui se rencontre en mécanique céleste, se présente également dans l'étude des vibrations des systèmes hyperstatiques de transmission par bielles de locomotives électriques (cf : H. Parodi, Nouvelles locomotives électriques à courant continu 650 V de 2 000 ch de la Cie des Chemins de fer d'Orléans. Revue Générale des Chemins de fer, mars 1922) ; mais la nature très complexe du sujet ne permet en général de dégager de l'étude analytique que quelques conclusions d'ordre général, notamment l'existence de zones étendues et non plus de valeurs isolées de vitesses critiques, et la solution complète ne peut guère être poussée dans chaque cas particulier que par un calcul numérique assez laborieux. Un travail de ce genre a été fait en 1894 pour l'auto-amorçage du moteur asynchrone monophasé sur capacité par M. M. BRILLOUIN qui en a autrefois publié les résultats dans l'*Eclairage Electrique* (Théorie d'un alternateur auto-exciteur, t. XI, 1897, p. 49).

Le cas des petites oscillations autour d'un état de régime permanent, peut il est vrai se traiter encore directement d'une manière relativement simple et c'est par une méthode de ce genre que M. BOUCHEROT a étudié en 1913 l'amortissement des alternateurs (*Lumière Electrique* XXIV, p. (2<sup>e</sup> série, pp. 166, 199, 230), mais au prix de calculs assez longs, où les approximations nécessaires ne s'imposent pas toujours dans leur ordre naturel. Or dans le cas tout au moins des machines polyphasées, il est possible par une combinaison convenable des équations différentielles relatives aux circuits du stator ou

du rotor, d'en faire disparaître les coefficients périodiques, en les ramenant à des équations différentielles à coefficients constants.

Considérons par exemple une machine polyphasée à rotor symétrique, telle qu'un moteur asynchrone, dont nous pourrions supposer pour simplifier, et sans perte de généralité, les enroulements diphasés.

Soit  $L$   $L'$  les coefficients de self inductance d'une phase du stator et d'une phase du rotor,  $M$  le maximum de leur coefficient d'induction mutuelle. Les coefficients d'inductance mutuelle au temps  $t$  seront respectivement :

$$M_{11'} = M_{22'} = M \cos \Omega t \quad \text{et} \quad M_{11'} = -M_{12'} = M \sin \Omega t$$

en désignant par  $\Omega t$  l'angle de phase du rotor par rapport à une direction fixe du stator. Soit d'autre part  $i_a$   $i_b$   $i'_1$   $i'_2$  les courants instantanés

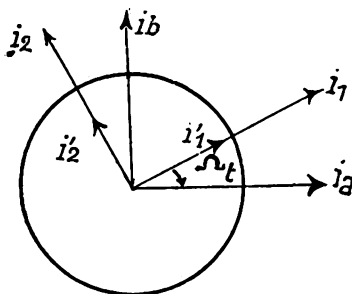


Figure 11.

dans les deux phases du stator et du rotor,

$$u_a = U \cos (\Omega t + \Phi), \quad u_b = U \sin (\Omega t + \Phi), \quad u'_1, \quad u'_2,$$

les tensions aux bornes correspondantes.

Les équations relatives aux 4 circuits sont :

$$U \cos (\Omega t + \Phi) = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} (M \cos \Omega t \cdot i'_1) - \frac{d}{dt} (M \sin \Omega t \cdot i'_2)$$

$$U \sin (\Omega t + \Phi) = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} (M \sin \Omega t \cdot i'_1) + \frac{d}{dt} (M \cos \Omega t \cdot i'_2)$$

$$u'_1 = R' i'_1 + L' \frac{di'_1}{dt} + \frac{d}{dt} (M \cos \Omega t \cdot i_a) + \frac{d}{dt} (M \sin \Omega t \cdot i_b)$$

$$u'_2 = R' i'_2 + L' \frac{di'_2}{dt} - \frac{d}{dt} (M \sin \Omega t \cdot i_a) + \frac{d}{dt} (M \cos \Omega t \cdot i_b)$$

Les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> équations mettent en évidence les 2 projections :

$$i_1 = i_a \cos \Omega t + i_b \sin \Omega t$$

$$i_2 = -i_a \sin \Omega t + i_b \cos \Omega t$$

et

sur les axes des phases du rotor, du vecteur dont les projections sur les phases du stator sont respectivement  $i_a$  et  $i_b$ .

Leur substitution à  $i_a$  et  $i_b$  ramène ces équations à la forme simple à coefficients constants.

$$\begin{aligned} u'_1 &= R'i'_1 + L' \frac{di'_1}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \\ u'_2 &= R'i'_2 + L' \frac{di'_2}{dt} + M \frac{di_2}{dt}. \end{aligned}$$

Pour aboutir au même résultat sur les deux premières équations il suffit de les combiner par addition après les avoir multipliées respectivement par  $\cos \Omega t$  et  $\sin \Omega t$ , puis par  $-\sin \Omega t$  et  $+\cos \Omega t$ , ce qui donne, moyennant quelques transformations :

$$U \cos \Phi = R i_1 + L \frac{di_1}{dt} - \Omega L i_2 + M \frac{di'_1}{dt} - \Omega M i'_2, \quad (1)$$

$$U \sin \Phi = R i_2 + L \frac{di_2}{dt} + \Omega L i_1 + M \frac{di'_2}{dt} + \Omega M i'_1, \quad (2)$$

Ces équations se réfèrent ainsi à deux circuits fictifs au stator, accompagnant le rotor dans son mouvement et parcourus par les courants  $i_1$  et  $i_2$  ; dans un alternateur dont l'axe polaire est dirigé suivant  $i'_1$  nous pourrions appeler respectivement ces courants réactif (ou magnétisant) et actif (ou moteur). Aux bornes de ces circuits agissent respectivement les tensions constantes  $U \cos \varphi$  et  $U \sin \varphi$ , et la forme des équations relatives à ces circuits fictifs ne diffère de celle correspondant aux mêmes circuits supposés fixes que par l'introduction des termes nouveaux,  $-\Omega L i_2$ ,  $-\Omega M i'_2$ ,  $\Omega L i_1$ ,  $\Omega M i'_1$ . Ces termes ressemblent aux termes en  $R i_1, \dots$ , etc., dûs aux résistances, en ce qu'ils sont proportionnels aux courants (ou vitesses de déplacement de l'électricité) mais ils en diffèrent par cette particularité essentielle que pour une paire de circuits telle que 1, 2 appartenant à la même partie de la machine (stator) le coefficient  $-\Omega L$  du terme en  $i_2$  dans l'équation 1 est égal et de signe contraire au coefficient du terme en  $i_1$  dans 2.

De ce fait ces termes disparaissent dans l'expression de la puissance obtenue en multipliant chacune des équations par le courant correspondant et en les ajoutant, de sorte que, contrairement aux termes de  $R i$ , ils ne correspondent à aucune dissipation d'énergie.

D'une manière générale pour  $n$  circuits, tandis que les résistances  $R_{11} R_{22} \dots R_{12} \dots$  propre et mutuelle des circuits forment un tableau ou matrice :

$$\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots\dots\dots \\ R_{21} & R_{22} & \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \end{vmatrix}$$

symétrique (c'est-à-dire que  $R_{12}=R_{21}$ , etc.), dont les termes sont les coefficients de la forme quadratique :

$$J = R_{11}i_1^2 + R_{22}i_2^2 + \dots\dots\dots + 2R_{12}i_1i_2 + \dots\dots\dots$$

qui représente la perte Joule, les coefficients  $X_{12}$   $X_{21}$ , etc. des nouveaux termes qu'introduit la considération des circuits fictifs forment un ensemble antisymétrique.

$$\begin{vmatrix} 0 & X_{12} & X_{13} \\ -X_{12} & 0 & X_{23} \\ -X_{13} & -X_{23} & 0 \end{vmatrix}$$

Des termes de même nature, proportionnels aux vitesses et cependant sans relation avec le frottement se présentent dans l'étude des petits mouvements des systèmes mécaniques à plusieurs degrés de liberté, notamment dans les gyroscopes, ce qui leur a fait donner le nom de termes gyroscopiques <sup>(1)</sup> (Traité de philosophie naturelle de Tait et Thomson, t. I). Ce rapprochement éclaire d'ailleurs profondément certains aspects paradoxaux du fonctionnement des alternateurs, qui tiennent à leur caractère essentiellement cinétique, et se présentent dès l'origine de leur étude, notamment la persistance en régime surexcité du couple synchronisant, et le signe négatif du coefficient d'amortissement dû à la résistance d'induit.

Ainsi ramenés à la forme linéaire à coefficients constants, les 4 équations différentielles du problème en  $i_1$   $i_2$   $i'_1$   $i'_2$  se résolvent de la manière classique en déterminant les solutions particulières de la forme  $e^{\alpha t}$  qui correspondent aux racines de l'équation algébrique caractéristique en  $\alpha$  que donne l'élimination de  $i_1$   $i_2$   $i'_1$   $i'_2$ .

Cette équation de degré pair, étant à coefficients réels, ne pourra présenter de racines imaginaires que par couples de valeurs conjuguées et, en fait, comme il résulte de ce qui suit, toutes les racines

(1) La réaction d'un gyroscope est proportionnelle à la vitesse angulaire de précession, mais, normale au déplacement, elle ne produit aucune dissipation d'énergie.



seront de cette nature. Or les deux racines conjuguées d'un même couple correspondent au point de vue physique à la même solution, de sorte qu'il serait suffisant et désirable que l'équation caractéristique, réduite au degré moitié, ne présentât qu'un nombre moitié moins grand de racines, formé d'un représentant seulement de chaque couple.

C'est ce que réalise dans les machines polyphasées symétriques, telles que celle considérée ci-dessus, dans lesquelles les propriétés du circuit magnétique et des enroulements sont les mêmes dans les diverses directions, la substitution à l'ensemble des grandeurs relatives aux deux phases, les courants par exemple  $i_1$   $i_2$ , du vecteur courant  $i$  qui a pour composantes suivant les axes 1 et 2,  $i_1$   $i_2$ , et que nous désigne-

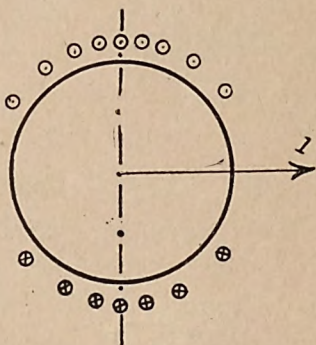


Figure 12

rons par  $i_1 + j i_2$ . Cette entité unique, loin de n'être qu'un symbole abstrait, représente au contraire directement en grandeur et en phase, l'état actuel de la distribution des ampères tours, qui résulte de la superposition des courants dans les diverses phases, de sorte que sa signification physique est plus étroite et immédiate au point de vue du fonctionnement de l'ensemble, que celle des courants composants eux-mêmes.

Ajoutons donc deux à deux les équations relatives respectivement au stator et au rotor après avoir multiplié les deuxièmes de chaque couple par  $j$  ; nous réduisons ainsi les 4 équations en  $i_1$   $i_2$   $i'_1$   $i'_2$  à deux seulement en  $i$  et  $i'$  :

$$V_e j^a = R i + L \frac{di}{dt} + j \Omega L i + M \frac{di'}{dt} + j \Omega M i' \quad (3)$$

$$0 = R' i' + L' \frac{di'}{dt} + M \frac{di}{dt} \quad (4)$$



qui contiennent cette fois des coefficients imaginaires, de même que l'équation caractéristique en  $\alpha$ , dont les racines, en nombre moitié de celui de l'équation correspondant au système initial des 4 équations à coefficients réels, ne seront plus deux à deux imaginaires conjuguées.

L'association des deux grandeurs  $i_1$   $i_2$  en une seule variable complexe, a permis ainsi de supprimer le double emploi des racines conjuguées en donnant une signification physique distincte (sens de rotation différent) aux deux racines du couple. L'équation caractéristique du problème initial n'est d'ailleurs autre que le produit de celle de degré moitié que donne la méthode symbolique par sa conjuguée, c'est-à-dire l'équation qui a pour racines les racines conjuguées.

L'équation 3 en régime permanent ( $\frac{d}{dt} = 0$ ) est précisément celle à laquelle conduit la méthode ordinaire vectorielle ou symbolique pour les courants alternatifs de pulsation  $\Omega$ . Elle s'obtient simplement dans le cas général en remplaçant dans l'équation ordinaire relative à un circuit fixe, le symbole  $\frac{d}{dt}$  par l'opérateur  $\frac{d}{dt} + j\Omega$  (1). Plus généralement la dérivée  $\frac{d^n}{dt^n}$  devra pour former l'équation relative au circuit fictif, être remplacée par l'opérateur  $\left(\frac{d}{dt} + j\Omega\right)^n$ , par exemple pour  $n=2$  :

$$\left(\frac{d}{dt} + j\Omega\right)^2 i = 2 \frac{d^2 i}{dt^2} + 2j\Omega \frac{di}{dt} - \Omega^2 i.$$

Il convient donc, lorsque les circuits du stator présentent de la capacité, de sorte que l'ordre de l'équation différentielle est, après élimination par différentiation du signe d'intégration, plus élevé que celui correspondant aux circuits du rotor, de procéder de préférence sur ce dernier à la considération des circuits fictifs, de manière à prévenir l'intervention de puissances élevées de  $\Omega$ . L'opérateur remplaçant  $\frac{d}{dt}$  est alors  $\left(\frac{d}{dt} - j\Omega\right)$ .

C'est ce qui a été fait dans l'étude ci-jointe relative à l'auto-excitation du moteur asynchrone.

---

(1) A un autre point de vue les deux espèces de forces électromotrices  $L \frac{di}{dt}$  et  $\Omega Li_1$ , ou leurs composantes  $L \frac{di}{dt}$  et  $-\Omega Li_2$  peuvent être rapprochées respectivement des f.é.m. statique ou de transformation, et dynamique ou de rotation, de la théorie des machines à collecteur.

La discussion du signe de la partie réelle des racines  $\alpha$  dont dépend la stabilité, peut se faire dans le cas des équations à coefficients réels, suivant plusieurs méthodes dont la plus connue est celle du déterminant d'Hurwitz. Routh a donné également une solution souvent plus simple dans son traité *Advanced Dynamics*. Enfin, M. LIÉNARD a bien voulu nous signaler comment une méthode, indiquée par Hermite et à laquelle il a apporté lui-même une contribution (Liénard et Chipart : sur le signe de la partie réelle des racines d'une équation algébrique ; *Jour. de Math. pures et appliquées*, t. X, 1914, p. 291), permettait de traiter le cas général des équations à coefficients complexes dont relève le problème ci-dessus.

M. LIÉNARD montre comment peut être menée la discussion d'une telle équation et donne la solution complète du problème de l'*auto-amorçage d'un moteur asynchrone fermé sur une capacité*.

Remplaçons les circuits réels du rotor par les circuits fictifs diphasés employés par M. Boucherot et appliquons la méthode qui vient d'être exposée par M. Darrieus, les équations concernant le fonctionnement d'un moteur asynchrone dont le stator est fermé sur une capacité  $C$  et une résistance  $R$  peuvent alors s'écrire

$$\begin{aligned} -L \frac{di}{dt} - M \frac{di'}{dt} &= Ri + \frac{1}{C} \int i dt \\ -M \left( \frac{di}{dt} - \Omega \sqrt{-1} i \right) - L' \left( \frac{di'}{dt} - \Omega \sqrt{-1} i' \right) &= R' i' \end{aligned}$$

ou, en dérivant la première équation et changeant l'ordre des termes,

$$\left( L \frac{d^2}{dt^2} + R \frac{d}{dt} + \frac{1}{C} \right) i + M \frac{d^2 i'}{dt^2} = 0. \quad (1)$$

$$\left( M \frac{d}{dt} - M \Omega \sqrt{-1} \right) i + \left( L' \frac{d}{dt} - L' \Omega \sqrt{-1} + R' \right) i' = 0 \quad (2)$$

$L$  et  $L'$  sont les self-inductances virtuelles (ou cycliques) des enroulements du stator et du rotor,  $M$  leur inductance mutuelle,  $\Omega$  la vitesse de rotation de l'appareil supposé bipolaire <sup>(1)</sup>.

L'équation caractéristique du système ci-dessus d'équations linéaires à coefficients constants est

(1) Pour un appareil à  $2p$  pôles, il faudrait écrire  $p\Omega$  au lieu de  $\Omega$ .

$$\begin{vmatrix} \alpha^2 + \frac{R}{L} \alpha + \frac{1}{CL} & \frac{M}{L} \alpha^2 \\ \frac{M}{L'} \alpha - \frac{M}{L'} \Omega \sqrt{-1} & \alpha - \Omega \sqrt{-1} + \frac{R'}{L'} \end{vmatrix} = 0.$$

Développant et posant pour simplifier

$$\frac{R}{L} = \rho \quad \frac{R'}{L'} = \rho' \quad \frac{1}{CL} = \gamma \quad 1 - \frac{M^2}{LL'} = \sigma \quad (3)$$

l'équation caractéristique prend la forme

$$\sigma \alpha^3 + [\rho + \rho' - \sigma \Omega \sqrt{-1}] \alpha^2 + [\rho \rho' + \gamma - \rho \Omega \sqrt{-1}] \alpha + \gamma \rho' - \gamma \Omega \sqrt{-1} = 0. \quad (4)$$

Cette équation caractéristique a trois racines. Si ces racines ont leur partie réelle négative (je dirai pour simplifier que les racines sont pseudonégatives), les expressions de  $i$  et  $i'$  contiennent des exponentielles à exposants réels négatifs et  $i$  et  $i'$  tendent vers zéro.

Si au contraire une ou plusieurs racines ont leur partie réelle positive (sont pseudopositives),  $i$  et  $i'$  augmentent indéfiniment.

Enfin si les racines sont, les unes pseudonégatives, les autres purement imaginaires,  $i$  et  $i'$  se réduisent au bout de très peu de temps à des fonctions sinusoïdales du temps et l'on a le phénomène d'auto-amorçage.

Il est donc très important de déterminer le signe de la partie réelle des racines de l'équation (4). Il n'y a pour cela qu'à appliquer la méthode imaginée par Hermite.

Sans faire toute la théorie de la méthode, remarquons ceci : quand les coefficients d'une équation algébrique varient d'une façon continue, les racines varient aussi d'une façon continue et la partie réelle d'une racine ne peut changer de signe sans s'annuler, au quel cas on a une racine purement imaginaire de la forme  $\omega \sqrt{-1}$ . Remplaçons donc dans (4)  $\alpha$  par  $\omega \sqrt{-1}$ . L'équation devient, après division par le cube de  $\sqrt{-1}$ .

$$\sigma \omega^3 - [\sigma \Omega + (\rho + \rho') \sqrt{-1}] \omega^2 + [-(\rho \rho' + \gamma) + \rho \Omega \sqrt{-1}] \omega + \gamma \Omega + \gamma \rho' \sqrt{-1} = 0.$$

Séparant les parties réelles et imaginaires, l'équation se décompose en deux autres qui devront être satisfaites simultanément pour une valeur réelle de  $\omega$  :

$$f(\omega) \equiv \sigma \omega^3 - \sigma \Omega \omega^2 - (\rho \rho' + \gamma) \omega + \gamma \Omega = 0 \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) \equiv (\rho + \rho') \omega^2 - \rho \Omega \omega - \gamma \rho' = 0 \quad (6)$$

Soit  $\mathcal{R}$  le résultat de ces deux équations calculé par la méthode de Bezout :

$$\mathcal{R} = \begin{vmatrix} \sigma(\rho + \rho') & -\sigma\rho\Omega & -\sigma\gamma\rho' \\ -\sigma\rho\Omega & (\rho + \rho')(\rho\rho' + \gamma) - \sigma\gamma\rho' + \sigma\rho\Omega^2 & -\gamma\Omega[\rho + \rho'(1 - \sigma)] \\ -\sigma\gamma\rho & -\gamma\Omega[\rho + \rho'(1 - \sigma)] & \gamma\rho'(\rho\rho' + \gamma) + \gamma\rho\Omega^2 \end{vmatrix}$$

$\mathcal{R} = 0$  exprime que les équations (5) et (6) ont une racine commune, condition nécessaire d'après ce qui précède pour que (4) admette une racine purement imaginaire.

Nous savons donc déjà que, lorsque les coefficients de l'équation (4) varient, une racine pseudonégative ne peut devenir pseudopositive ou inversement sans que  $\mathcal{R}$  passe par zéro. Le signe de  $\mathcal{R}$  doit intervenir dans la détermination du signe de la partie réelle des racines de (4).

Pour aller plus loin il faut faire intervenir le résultat suivant établi par Hermite.

Le résultant  $\mathcal{R}$  obtenu par la méthode de Bezout, est un déterminant symétrique. On peut le considérer comme le discriminant d'une certaine forme quadratique et les signes des carrés indépendants en lesquels on peut décomposer la forme quadratique sont contraires aux signes des parties réelles des racines de l'équation.

Il est d'ailleurs inutile, pour avoir les signes des carrés, d'écrire la forme quadratique et d'effectuer la décomposition. Il suffit de considérer la suite

$$\mathcal{R} \quad \mathcal{R}_1 \quad \mathcal{R}_2 \quad 1 \tag{7}$$

où  $\mathcal{R}_1$  est l'un quelconque des mineurs symétriques de  $\mathcal{R}$  obtenu en supprimant dans  $\mathcal{R}$  une ligne et une colonne de mêmes rangs et où  $\mathcal{R}_2$  est déduit de  $\mathcal{R}_1$  en répétant la même opération.

On peut alors énoncer le résultat suivant :

*Les nombres de racines pseudonégatives et pseudopositives de l'équation (4) sont respectivement égaux aux nombres de permanences et de variations de la suite (7).*

Or, si l'on prend pour  $\mathcal{R}$  le mineur du terme central, on voit facilement que  $\mathcal{R}_1$  et  $\mathcal{R}_2$  sont essentiellement positifs [cela résulte de ce que les coefficients  $\rho$ ,  $\rho'$  et  $\gamma$  sont positifs, et que, en outre, le coefficient de dispersion  $\sigma$  est compris entre 0 et 1]. La suite (7) présente donc nécessairement deux permanences et il y a une troisième permanence ou une variation suivant que  $\mathcal{R}$  est positif ou négatif.

En résumé :

Si  $\mathcal{R} > 0$ , les trois racines  $\alpha$  sont pseudonégatives et les intensités tendent vers zéro.

Si  $\mathcal{R} < 0$ , deux racines en  $\alpha$  sont pseudonégatives et la troisième pseudopositive : les intensités augmentent indéfiniment.

Enfin, si  $\mathcal{R} = 0$ , deux racines sont pseudonégatives et la troisième est purement imaginaire, de la forme  $\omega \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  racine commune aux équations (5) et (6) représente la pulsation du régime sinusoïdal vers lequel tendent les courants.

D'après cela, tout le problème est ramené à la seule discussion du signe de  $\mathcal{R}$ .

En développant le déterminant, on trouve que  $\mathcal{R}$  est de la forme

$$\mathcal{R} = a\Omega^4 + b\Omega^2 + c,$$

les coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  étant des fonctions de  $\rho$ ,  $\rho'$ ,  $\gamma$  et  $\sigma$  que je ne transcris pas.

Pour que  $\mathcal{R}$  puisse s'annuler, il faut que les racines du trinôme  $a\Omega^2 + b\Omega + c$  soient réelles et positives, ce qui entraîne

$$b < 0, \quad b^2 - 4ac > 0.$$

Ces deux inégalités se condensent en une seule

$$-b > 2\sqrt{ac},$$

le radical étant pris en valeur absolue.

Tous calculs faits, et après suppression d'un facteur

$$\sigma\gamma\rho'[\rho + \rho' + \rho'\sqrt{\sigma}]^2$$

essentiellement positif, la condition précédente devient

$$\gamma(1 - \sqrt{\sigma})^2 > \rho^2 \quad (8)$$

ou

$$1 - \sqrt{\sigma} > \frac{\rho}{\sqrt{\gamma}} = R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (8')$$

Telle est donc simplement la condition de réalité des racines de l'équation  $\mathcal{R}(\Omega) = 0$ . On peut retrouver cette condition d'une autre manière plus rapide. Au lieu d'éliminer  $\omega$  entre (5) et (6) pour obtenir l'équation  $\mathcal{R}(\Omega) = 0$  puis chercher, pour chaque racine  $\Omega$ , quelle est la racine  $\omega$  commune à (5) et (6), on peut au contraire éliminer  $\Omega$  entre (5) et (6) pour chercher les valeurs de  $\omega$  pour lesquelles ces équations ont une racine commune en  $\Omega$ . Les calculs sont plus sim-

ples parce que les relations (5) et (6) sont du premier degré en  $\Omega$ . En les résolvant, il vient :

$$\Omega = \omega + \frac{\rho' \omega}{\gamma - \sigma \omega^2} \quad (5')$$

$$\Omega = \omega + \frac{\rho' (\omega^2 - \gamma)}{\rho \omega}. \quad (6')$$

L'élimination de  $\Omega$  est immédiate et donne

$$\rho^2 \omega^2 = (\omega^2 - \gamma) (\gamma - \sigma \omega^2) \quad (9)$$

ou

$$\psi(\omega) \equiv \sigma \omega^4 + [\rho^2 - \gamma(1 + \sigma)] \omega^2 + \gamma^2 = 0. \quad (9')$$

La condition de réalité des racines est

$$\gamma(1 + \sigma) - \rho^2 > 2\sqrt{\sigma\gamma},$$

soit précisément la condition (8).

La forme de l'équation (9) montre que les racines en  $\omega^2$ , quand elles sont réelles, sont nécessairement comprises entre  $\gamma$  et  $\frac{\gamma}{\sigma}$ .

Il résulte alors des relations (5') et (6') que  $\Omega$  a toujours le signe de  $\omega$  et est plus grand que lui en valeur absolue. En outre, à la plus grande valeur de  $\omega$  correspond la plus grande valeur de  $\Omega$ . Les quatre racines de  $\mathcal{R}(\Omega) = 0$  et de (9) ou (9') se correspondent dans l'ordre des grandeurs croissantes

$$\begin{array}{cccc} -\omega_2 & -\omega_1 & +\omega_1 & +\omega_2 \\ -\Omega_2 & -\Omega_1 & +\Omega_1 & +\Omega_2 \end{array}$$

Nous sommes maintenant à même de préciser les conditions d'auto-amorçage.

A) Soit d'abord

$$1 - \sqrt{\sigma} < \frac{\rho}{\sqrt{\gamma}} = \mathcal{R} \sqrt{\frac{\bar{C}}{\bar{L}}}.$$

$\mathcal{R}(\Omega)$  est positif quel que soit  $\Omega$ , les trois racines en  $\alpha$  sont pseudo-négatives et les courants tendent vers zéro. Il n'y a pas d'autoamorçage possible.

B) Soit au contraire

$$1 - \sqrt{\sigma} > \mathcal{R} \sqrt{\frac{\bar{C}}{\bar{L}}}.$$

$\mathcal{R}(\Omega)$  est positif ou négatif suivant les valeurs de  $\Omega$ .

Supposons d'abord  $\Omega$  compris entre les racines  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ .

Une racine  $\alpha$  est pseudo-positive et les courants tendent à croître indéfiniment. C'est ce qui arriverait si  $\Omega$  était bien maintenu constant. Mais l'accroissement des courants et des pertes Joule qui en résulte augmente nécessairement le couple résistant exercé par le moteur asynchrone. De là résultera une baisse de la vitesse qui diminuera jusqu'à  $\Omega_1$  puisque, tant que  $\Omega$  est supérieur à  $\Omega_1$ , les courants et le couple résistant ne cessent de croître. Une fois à la vitesse  $\Omega_1$ , les courants deviennent sinusoïdaux de pulsation  $\omega_1$ .

Supposons maintenant  $\Omega$  inférieur à  $\Omega_1$ . Les trois racines  $\alpha$  sont pseudonégatives, les courants s'éteignent et le couple résistant exercé par le moteur asynchrone diminue. A mesure que le couple résistant diminue la vitesse croît. Si l'appareil qui entraîne le rotor est capable de pousser la vitesse jusqu'à  $\Omega_1$ , la baisse des courants s'arrête.

On voit ainsi que la vitesse  $\Omega_1$  correspondant à un régime stable d'autoamorçage <sup>(1)</sup>.

Supposons enfin que  $\Omega$  soit supérieur à  $\Omega_2$ . Les trois racines en  $\alpha$  sont pseudonégatives, le couple résistant baisse, et la vitesse  $\Omega$  ne peut tendre qu'à croître et à s'éloigner de  $\Omega_2$ . L'autoamorçage est impossible, sauf événement fortuit, provoquant une baisse de vitesse jusqu'en dessous de  $\Omega_2$ .

La vitesse  $\Omega_2$  correspond donc à un régime d'autoamorçage qui est instable.

*Influence de la saturation.* — Jusqu'ici nous avons négligé les effets de la saturation. Il est impossible de tenir compte de celle-ci rigoureusement, les équations cessant d'être linéaires lorsque le métal se sature. Il faut se contenter d'une approximation où l'on continuera à parler de coefficients d'induction malgré la saturation.

Je me suis inspiré de la méthode imaginée par Kapp dans l'étude de la chute de tension des transformateurs. J'admets en conséquence que l'on peut considérer comme constantes les self-inductances des fuites primaires et secondaires et par suite les quantités  $L\sigma$  et  $L'\sigma$ . Je pose alors

$$\rho = r\sigma \quad \rho' = r'\sigma \quad \gamma = c\sigma$$

de telle sorte que les quantités

$$r = \frac{R}{L\sigma} \quad r' = \frac{R'}{L'\sigma} \quad c = \frac{1}{CL\sigma} \quad (10)$$

(1) Les raisonnements faits pour tenir compte des variations de vitesse ne sont qu'approchés. Pour plus de rigueur, il faudrait joindre l'équation différentielle régissant le mouvement aux équations (1) et (2). Les calculs deviendraient presque inextricables.

seront des quantités indépendantes de la saturation, laquelle sera caractérisée par le seul coefficient  $\sigma$ .

En tenant compte de (10), l'équation (9') devient

$$\frac{\psi(\omega)}{\sigma} \equiv \omega^4 + [\sigma r^2 - c(1 + \sigma)] \omega^2 + \sigma c^2 = 0.$$

Il est facile de voir qu'un accroissement de  $\sigma$  augmente la plus petite racine  $\omega_1$  et diminue la plus grande  $\omega_2$ .  $\Omega_1$  augmente comme  $\omega_1$ .

Voici alors comment la saturation agit. Soit d'abord  $\Omega$  supérieur à  $\Omega_1$  : les courants croissent, la saturation apparaît,  $\Omega_1$  augmente, ce qui contribue à rapprocher  $\Omega$  et  $\Omega_1$  et est favorable à la stabilité. Si au contraire  $\Omega$  était inférieur à  $\Omega_1$  et qu'au début les courants soient assez intenses pour saturer le métal, la baisse des courants qui se produit tant que  $\Omega < \Omega_1$  diminuerait la saturation et  $\Omega_1$ , ce qui est encore favorable à la stabilité.

On se rend ainsi compte, par ce raisonnement qui n'a pas la prétention d'être rigoureux, que la saturation ne fait qu'accroître la stabilité pour la racine inférieure.

#### Annexe

Le cas traité ci-dessus n'est pas celui examiné par M. Genkin dans une précédente réunion de la sixième section (Séance du 9 nov. 1928, B.S.F.E., décembre 1928).

M. Genkin avait supposé que la résistance et la capacité sur lesquelles le stator était fermé étaient en parallèle et non en série.

Le problème se traite exactement de la même manière et les résultats sont analogues. Je me bornerai à reproduire les grandes lignes du calcul qui est plus laborieux.

Les équations fondamentales sont au nombre de trois au lieu de deux, car le stator donne lieu à deux relations au lieu d'une. Il y a d'abord la relation connue

$$I \frac{di}{dt} + M \frac{dv}{dt} = u,$$

où  $u$  représente la tension aux bornes A et B des dérivations.

On a en outre la relation

$$C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R} + i = 0.$$

qui exprime la première loi de Kirchhoff aux points de jonction A et B.



Sans écrire l'équation caractéristique, je reproduis seulement les équations suivantes, correspondant à celles de même numéro du texte

$$f(\omega) \equiv \sigma\omega^3 - \sigma\Omega\omega^2 - \frac{\rho + \rho'}{\rho} \gamma\omega + \gamma\Omega = 0 \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) \equiv \left(\rho' + \sigma \frac{\gamma}{\rho}\right) \omega^2 - \frac{\sigma}{\rho} \gamma\Omega\omega - \gamma\rho' = 0 \quad (6)$$

$$\Omega = \omega + \rho' \frac{\frac{\gamma}{\rho} \omega}{\gamma - \sigma\omega^2} \quad (5')$$

$$\Omega = \omega + \rho' \frac{\omega^2 - \gamma}{\sigma \frac{\gamma}{\rho} \omega} \quad (6')$$

Eliminant  $\Omega$  on obtient l'équation en  $\omega^2$  dont la condition de réalité des racines est

$$\frac{1}{\sqrt{\sigma}} - 1 > \frac{\sqrt{\gamma}}{\rho} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (8)$$

C'est la condition trouvée par M. Genkin (Bulletin S. F. E., décembre 1928, p. 1229, condition (6))

Les conditions de stabilité s'étudient exactement comme dans le cas précédent et les conclusions sont les mêmes : seule la plus petite racine  $\omega_1$  correspond à un régime stable d'autoamorçage et la saturation est favorable à la stabilité.

Si l'on compare les inégalités (8) pour les deux cas, on s'aperçoit que les seconds membres sont des valeurs inverses l'une de l'autre.

M. GENKIN fait remarquer que dans la méthode symbolique utilisée par M. Darrieus, les coefficients constants figurant dans les équations se rapportent à deux circuits fictifs équivalents à l'ensemble des circuits réels des enroulements.

A première vue, ces coefficients présentent beaucoup d'analogie avec les coefficients cycliques introduits par M. Blondel dans l'étude des machines à champ tournant.

Comme on le sait, les coefficients cycliques se rapportent également à deux circuits fictifs électriquement équivalents à l'ensemble de tous les circuits réels et se déduisent en considérant un système d'ampère-tours tournant synchroniquement avec le flux. Toutefois, en régime stationnaire, les vecteurs d'ampère-tours et de flux sont invariables dans le temps, le problème ne comportant plus qu'une rotation dans l'espace.

Il paraît, à priori, possible de conserver la notion des coefficients cycliques en régime transitoire, en admettant la variation simultanée dans l'espace et dans le temps.

Présidence de M. DARRIEUS

SÉANCE DU 15 JANVIER 1930. — I. M. BUNET résume le rapport qu'il présentera à la Semaine de Novembre prochain sur la *détermination des données caractéristiques des transformateurs* <sup>(1)</sup>.

II. — Suite à la discussion de la communication de M. PESTARINI sur les *moteurs à double alimentation*.

M. PESTARINI est d'accord en général avec les techniciens qui ont pris part à la discussion ; il fait noter toutefois qu'il entend toujours considérer non le régime stationnaire, mais le régime rapidement variable. Il ajoute ensuite que pour mieux utiliser la partie tournante folle, on pourrait disposer sur celle-ci un enroulement polyphasé aboutissant à des bagues. En branchant au moment du démarrage ces bagues sur une résistance extérieure, on obtiendrait un couple suffisant pour que ce moteur puisse démarrer par ses propres moyens. Il s'agit d'ailleurs d'une suggestion qui n'a pas encore été mise en pratique.

M. GRATZMULLER demande si dans certains cas, on n'a pas alimenté une cage folle au moyen de courant continu.

M. PESTARINI répond affirmativement, en faisant remarquer qu'on avait alors en vue de ramener le facteur de puissance à l'unité.

Le Dr SCHÖEN, reprenant une idée de Maurice Leblanc, a, en effet, réalisé une telle alimentation sur une locomotive d'essai construite par Krupp.

## 2<sup>e</sup> SECTION. — ÉCLAIRAGE ET CHAUFFAGE

Président : M. DARMOIS

SÉANCE DU 17 DÉCEMBRE 1929. — I. — Fin de la communication de M. Lesouple sur « *l'éclairage public par l'électricité en France* ».

---

(1) Le rapport de M. Bunet et la discussion qui l'a suivi paraîtront dans un Bulletin ultérieur.

M. LESOUPLE donne communication de la deuxième partie de son rapport. Il expose les progrès réalisés dans l'éclairage public par l'électricité à Paris au cours de 1928, et étudie l'état actuel de l'éclairage public de plusieurs villes de province : Marseille, Grenoble, Montpellier, etc... et de quelques agglomérations de moindre importance.

Il résulte de cette statistique d'ensemble que c'est l'éclairage axial qui s'est le plus développé.

Le rapport de M. LESOUPLE a été publié in-extenso dans le Bulletin de février 1930.

M. MATIGOT signale qu'il est question d'éclairer par projecteurs la route Antibes-Grenoble. On prévoit l'utilisation de lampes alimentées sous une tension de 12 à 24 V. Les foyers lumineux seraient espacés de 60 à 90 mètres et donneraient un éclairage moyen de 1 lux. La puissance consommée par kilomètre serait de 4 kW environ.

II. — M. DARMOIS fait une communication au sujet d'un travail de M. Haldane, Membre de l'Institution of Electrical Engineers sur « *Le chauffage par machine frigorifique* ».

M. HALDANE, reprenant une suggestion de Lord Kelvin, a réussi à prouver théoriquement et pratiquement qu'il est possible de réaliser un procédé économique de chauffage en utilisant la machine frigorifique. On sait que la vaporisation de l'ammoniac par détente est employée couramment pour la production du froid ; si, par application d'un certain travail, on comprime le gaz ammoniac jusqu'à amener sa liquéfaction, on recueille par contre de la chaleur.

Il est aisé de montrer, par quelques formules, que le rendement de cette transformation est particulièrement intéressant. Soit  $q$  la quantité de chaleur empruntée à la source froide,  $Q$  la quantité de chaleur versée à la source chaude  $T$  et  $T'$  les températures absolues des sources froide et chaude.

En appliquant le principe de Carnot, on a

$$\frac{q}{T} = \frac{Q}{T'} = \frac{Q - q}{T' - T}. \quad (1)$$

A la compression du gaz correspond la dépense d'un certain travail

$$\mathfrak{E} = (Q - q) J.$$

De (1) on tire en multipliant par  $J$  :

$$\frac{JQ}{T} = \frac{J(Q - q)}{T' - T} = \frac{\mathfrak{E}}{T' - T}$$

$$JQ = \mathfrak{E} \frac{T'}{T' - T}.$$

Plus la différence des températures absolues est faible, plus la quantité de chaleur versée à la source chaude est grande.

$\frac{T'}{T' - T}$  représente le rendement théorique de la transformation.

Si  $T = 0^{\circ} \text{C} + 273$   
et  $T' = 20^{\circ} \text{C} + 273$

on a un rendement voisin de 15.

M. HALDANE a cherché à vérifier ce rendement sur des installations frigorifiques existantes et est parvenu à obtenir un rendement pratique égal à 50 pour cent de ce rendement théorique.

Il a réalisé chez lui une installation servant au chauffage et à la cuisine, le travail de compression étant fourni par un moteur électrique.

Ce genre d'installation présente les principaux avantages suivants : économie appréciable, étant donné le rendement élevé qu'il est possible d'atteindre ; mise en marche et arrêt par la seule manœuvre d'un interrupteur.

M. HALDANE a étudié notamment le chauffage de l'eau d'une piscine à  $25^{\circ}\text{C}$  : il conclut que l'économie annuelle réalisée grâce au système préconisé, serait de 30 pour cent. Il faut signaler que ce procédé nécessite, dans tous les cas, la mise en jeu, du côté de la source froide, d'un volume d'eau assez considérable.

### 3<sup>e</sup> SECTION. -- ÉLECTROCHIMIE. — ÉLECTROMÉTALLURGIE. — PILES — ACCUMULATEURS

Président : M. Ch. MARIE

SÉANCE DU 21 DÉCEMBRE 1929. — I. — M. le colonel VIRY, Directeur de la Manufacture d'armes de Chatellerault, présente la communication suivante sur les *recuits partiels par induction*.

#### I. — PRINCIPE DU RECUI PARTIEL PAR INDUCTION

Il se présente dans la fabrication des étuis de cartouches pour fusils ou des douilles pour obus un problème très délicat, c'est le recuit partiel du collet

Cette opération thermique est nécessaire : dans le premier recuit partiel pour permettre l'opération du sertissage et passer de la forme

cylindrique du produit à sa forme définitive ; dans le deuxième recuit partiel en fin de fabrication, pour supprimer les tensions intérieures qui déterminent ultérieurement en magasin des fentes au collet <sup>(1)</sup>.

Ce recuit demande une grande précision surtout pour le deuxième recuit partiel, à ce point qu'il a été qualifié « d'acrobatie métallurgique », il doit en effet être exécuté dans des limites très serrées ; si le recuit est trop intense le métal n'a plus la résistance et l'élasticité

1<sup>er</sup> Recuit      2<sup>em</sup> Recuit  
partiel      partiel

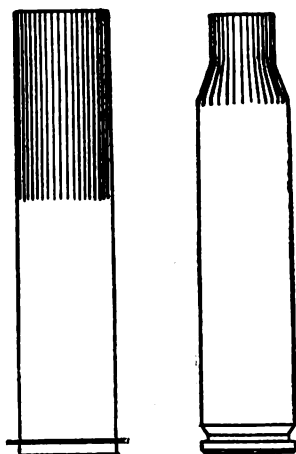


Fig. 1. -- (La partie ombrée représente la partie à recuire.)

nécessaires, en particulier pour le maintien de la balle ; s'il est insuffisant. les étuis fendent en magasin.

Aucun des procédés, actuellement en usage, ne donne satisfaction.

Il était séduisant de chercher à réaliser ce recuit par des courants d'induction circulant dans la partie à chauffer en s'inspirant des fours à induction à basse fréquence. Il suffit, à cet effet, de constituer un circuit magnétique feuilleté A (fig. 2) avec un entre-fer annulaire B pouvant laisser passage à la pièce tubulaire C dont on se pro-

(1) L'Inspecteur des Munitions de l'Armée Américaine a estimé à 7 millions de dollars les dégâts dus aux fissurations du collet dans les stocks de cartouches provenant des commandes en cours au moment de l'Armistice.



veut. C'est ainsi qu'avec un courant à 1 000 p:s, il est possible de porter au rouge le collet d'un étui de cartouche de 7,5 mm de diamètre en moins de 2 s avec une induction normale.

## 2. — MACHINES AUTOMATIQUES A RECUIRE

Si les produits sont toujours enfoncés de la même quantité dans le transformateur, l'intensité du recuit est fonction de la tension aux bornes de la bobine primaire et de la durée du séjour dans l'appareil. Cette durée étant très faible, il est nécessaire, pour en assurer la constance, d'accoupler les fours à une machine automatique chargée

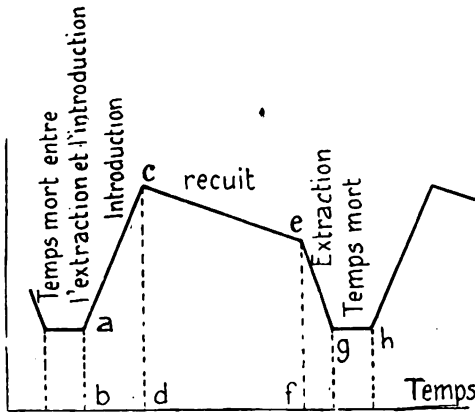


Figure 3.

de l'introduction et de l'extraction de la pièce ; la durée du chauffage se trouve ainsi réglée par la vitesse de la machine.

La figure 2 donne le schéma d'une machine à recuire le collet de douilles pour obus alimentant un four. Les douilles sont déposées dans un couloir d'alimentation *I*. Un tiroir *N* amène au moment voulu les douilles en prise avec la tête d'un poussoir *K* chargé de l'introduction de la pièce, un extracteur *L* produit l'extraction au moment du recul du poussoir.

## 3. — MACHINES ROTATIVES AUTOMATIQUES

L'intensité du courant absorbé par un four ainsi en service varie considérablement en fonction du temps comme le montre la figure 3 ; *ab* est le courant du transformateur à vide avant l'introduction du produit dans le champ, *dc* le courant maximum lorsque le produit

arrive à sa position de chauffage, *ef* le courant en fin de chauffage immédiatement avant l'extraction, ce courant est inférieur au précédent à cause de l'augmentation de résistance du produit porté au rouge.

Pour régulariser le courant, et augmenter le rendement, les fours sont disposés régulièrement sur la périphérie d'une roue d'entraînement et reçoivent successivement dans leur mouvement de rotation les produits à chauffer d'un couloir d'alimentation.

Les produits sont ainsi chauffés pendant la rotation des fours et éjectés vers la fin de chaque révolution de la machine. L'intensité du chauffage, qui est fonction du temps de passage des produits dans les fours, peut donc être réglée en agissant sur la vitesse de rotation

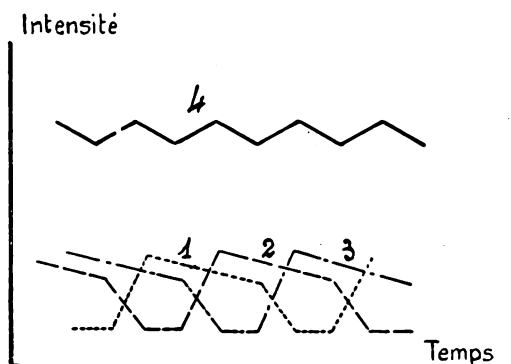


Figure 4.

de la machine ; d'autre part, le rendement, c'est-à-dire le nombre de produits chauffés à l'heure, est proportionnel au nombre de fours disposés sur la roue. Les circuits des fours sont branchés en quantité et le courant absorbé par la machine est la somme des courants absorbés par les fours.

La figure 4 montre comment dans une telle machine le courant est régularisé ; elle représente les courants absorbés dans une machine à 3 fours ; les courbes 1, 2, 3 représentent respectivement les intensités des courants absorbés par le premier, le deuxième et le troisième four ; on voit que les courants de chaque four sont décalés les uns par rapport aux autres et que la machine a été réglée de manière que, d'une part, le commencement de l'extraction pour un four coïncide avec l'entrée du produit dans le champ pour un autre four et que, d'autre part, la sortie du champ pour un four coïncide avec l'enfon-



cement complet du produit dans un autre. Dans ces conditions la courbe résultante 4 qui représente le courant absorbé par la machine est simplement ondulée et d'autant moins que le nombre de fours est plus grand.

La machine pour le premier recuit partiel des étuis de 7,5 mm comprend 6 fours, elle tourne normalement à la vitesse de 15 t/mn (barillet) son rendement est par suite de 5 400 étuis à l'heure ; à ce rendement et l'intensité de recuit étant réglé pour obtenir une trace visible de 26 mm, la machine absorbe une puissance de 1 650 W avec un  $\cos \varphi = 0.58$ .

La machine de deuxième recuit partiel comporte 5 fours, sa vitesse est de 18 t/mn et son rendement est également de 5 400 étuis à l'heure avec une puissance absorbée de 1 100 W correspondant à une trace visible du recuit de 15 mm, son  $\cos \varphi$  est de 0,4, plus faible que pour le premier recuit partiel, la forme de l'étui nécessitant un entrefer plus grand ; elle ne diffère de la machine de premier recuit que par le nombre de fours, 5 au lieu de 6 (pour la même tension, la durée de chauffage est moindre pour le deuxième recuit que pour le premier) et par le dispositif d'extraction, l'étui de premier recuit ayant une collerette et l'étui du deuxième une gorge.

Il est intéressant de noter que, quelque soit le dispositif employé, l'extraction est facilitée par la répulsion électro-dynamique énergique exercée sur l'étui qui tend à le rejeter hors du four.

#### 4. — DESCRIPTION D'UNE INSTALLATION

Une installation comprend : *un groupe convertisseur* destiné à transformer le courant dont on dispose en courant à 1 000 p.s, 300 V, *un tableau de distribution et les machines à recuire*. Dans les installations pour étuis de cartouches un groupe peut commander à volonté :

4 machines de premier recuit ou 6 machines de deuxième recuit ou 2 machines de premier recuit et 3 machines de deuxième recuit.

La figure 5 représente l'ensemble d'une installation et la figure 6 en donne le schéma. Les machines sont branchées en dérivation sur la ligne à 1 000 p.s. Une batterie de condensateurs en série assure la constance de la tension et par suite celle du chauffage quel que soit le nombre des machines en service. Un fusible de tension placé aux



recupérées ; le produit emporte plus de calories que le courant qui l'a parcouru n'en a développé. On constate, en effet, que la température de l'appareil est plus élevée à vide qu'en charge, c'est donc que le produit emporte une partie des calories dues aux pertes du transformateur lui-même.

Le rendement thermique se trouve ainsi être supérieur à celui du rendement électrique du transformateur (1). — La température des fours n'est d'ailleurs pas supérieure à celle admise dans les machines électriques usuelles. Après 9 h de fonctionnement continu au régime maximum de 15 mm de hauteur de recuit pour le deuxième recuit et de 26 mm pour le premier recuit la température des fours

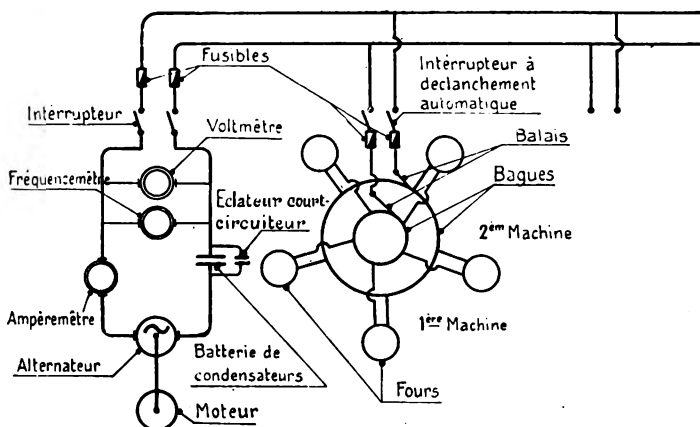


Figure 6.

au point le plus chaud est de 80°C pour une température ambiante de 29°C.

Le chauffage est nettement local. — Il y a lieu de remarquer d'autre part que le chauffage étant localisé, une partie de la quantité de chaleur fournie s'écoule par conductibilité dans les parties de la pièces voisines de la zone à chauffer et constitue une perte qui nuit

(1) Une machine de premier recuit partiel absorbe, au régime de 5.400 étuis à l'heure et pour une hauteur de recuit de 25 mm, une puissance de 1.650 W et à vide 330 W, les pertes thermiques en charge sont donc inférieures à 330 W et le rendement thermique est supérieur à  $\frac{1650-330}{1650}$  = 0,8 alors que le rendement élec-

trique est inférieur à  $\frac{1650-330}{1650}$

en même temps au rendement ; cette perte, proportionnelle au temps, est particulièrement faible dans ce procédé en raison de la rapidité extrême du chauffage.

*Régularité et facilité de réglage du chauffage.* — Le chauffage n'étant fonction que de la tension et de la vitesse des machines, la lecture du voltmètre et du fréquencemètre suffit pour contrôler sa constance ; en agissant sur le rhéostat de champ de l'alternateur, on peut, avec la plus grande facilité, régler le chauffage.

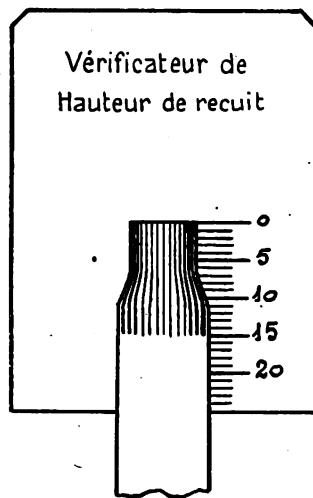


Figure 7.

*Contrôle du chauffage par la trace visible.* — Le chauffage partiel localisé par induction laisse sur les produits une trace très caractéristique limitée par une ligne irisée particulièrement nette et il est possible de définir l'intensité d'un recuit par la hauteur de cette trace visible.

Sur les produits en laiton, comme les étuis de cartouches, cette trace de couleur platinée avec sa ligne irisée tranchant nettement sur la couleur jaune du laiton est précieuse pour contrôler à toute époque non seulement si les étuis ont été recuits, mais s'ils ont été recuits à la valeur voulue. La figure 7 représente un étui de cartouche dont la valeur du recuit est de 15 mm.

6. — INTÉRÊT DE L'EMPLOI DE PUISSANCES MASSIQUES ÉLEVÉES  
DANS LE CHAUFFAGE PAR INDUCTION

*Application aux fours à haute fréquence dits sans fer.* — On a vu que le rendement thermique exceptionnel de ce procédé de chauffage était dû, d'une part, à ce qu'il se fait par induction, c'est-à-dire au sein même de la matière à chauffer et, d'autre part, à sa rapidité extrême.

Dans les machines de deuxième recuit partiel qui ont été réalisées, *le collet de l'étui est porté à une température d'environ 600°C en 2,5 s.*

Comparons, par exemple, 2 fours à induction à haute fréquence dits fours sans fer destinés au chauffage de petites pièces toutes de même dimension. Dans l'un 100 pièces sont chauffées à la fois alors que l'autre, dimensionné pour une seule pièce, est monté sur une machine automatique du type précédemment décrit.

Si nous appliquons sur ce dernier four toute la puissance utile appliquée sur le premier, la puissance utile massique (par kilogramme de métal chauffé) est 100 fois plus forte. Les pièces devant être portées à la même température dans les 2 fours (énergie totale utile pour 100 pièces la même dans les 2 cas), le temps nécessaire et par suite les pertes seront 100 fois plus faibles dans le four unitaire en supposant que la vitesse de déperdition ramenée à une pièce soit la même dans les deux fours ; la vitesse de déperdition du four unitaire est, en effet, plutôt inférieure à celle du premier.

L'énergie nécessaire pour chauffer 100 pièces (énergie utile plus pertes) sera donc bien plus faible en utilisant le deuxième four.

On conçoit ainsi tout l'intérêt que peut présenter le chauffage individuel par induction de petites pièces construites en grande série joint à l'utilisation de puissances massiques relativement considérables.

Il y a lieu de remarquer à ce sujet que seul le chauffage par induction permet l'utilisation pratique de puissances massiques élevées (1). En effet, dans tous les autres appareils de chauffage le transport de calories, de l'extérieur au corps à chauffer, est régi par la différence de température  $T-t$  entre l'élément chauffant et le corps à chauffer.

---

(1) En mettant à part le chauffage par résistance dans lequel la pièce elle-même constitue la résistance.

Si l'on augmente la puissance massique, l'énergie utile restant constante, on sera amené à augmenter également  $T-t$ . Or, la vitesse de déperdition est sensiblement proportionnelle à  $T-t_0$ , différence entre la température de l'élément chauffant et la température ambiante, elle croît donc avec la puissance massique. Par suite ce que l'on gagnera en diminuant le temps de chauffe sera perdu en partie par suite de l'augmentation de la vitesse de déperdition.

On se trouve d'ailleurs très rapidement limité dans l'augmentation de la puissance massique par la température des éléments chauffants.

## 7. — CONCLUSION

En résumé, le principe des machines rotatives précédemment décrit s'applique également bien aux fours à induction dits sans fer et permettrait en particulier la réalisation de machines automatiques desti-

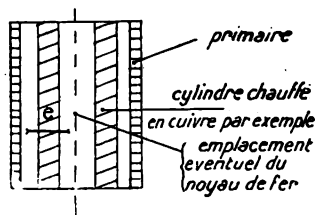


Figure 8.

nées au traitement thermique individuel de pièces fabriquées en grande série lorsque la brutalité du chauffage n'est pas incompatible avec ce traitement. La température serait donnée avec précision et pourrait toujours être maintenue constante par la régularité de la vitesse de la machine et de la tension à ses bornes.

M. BUNET. — Il est intéressant, d'une manière générale, de savoir dans quels cas un noyau de fer est utile pour le chauffage par induction d'un cylindre creux (fig. 8), et dans quel cas ce noyau est superflu.

Si l'épaisseur  $e$  du cylindre chauffé est notablement supérieure à l'épaisseur

$$e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

de la « peau » d'effet Kelvin dans ce cylindre, il n'y a pas de force magnétomotrice dans le noyau de fer et ce dernier ne sert à rien. Si,

au contraire, l'épaisseur  $e$  est inférieure à  $\epsilon$ , il y a une force électromotrice dans le noyau et la présence de celui-ci accroît la rapidité du chauffage.

II. — M. ANTOINE présente une communication sur une réalisation industrielle de l'accumulateur Plomb-zinc : l'accumulateur léger Pouchain dont le résumé est donné ci-après.

#### ETUDE DU COUPLE PLOMB-ZINC

Ce couple est obtenu en plongeant dans une solution sulfurique une lame de plomb peroxydée et une lame de zinc.

Sa force électromotrice est de 2,5 V environ, c'est-à-dire 25 pour cent supérieure à celle du couple peroxyde de plomb-plomb.

En 1879, Reynier étudia l'utilisation de ce couple appliqué aux accumulateurs électriques ; ses travaux restèrent sans résultats pratiques.

*Fonctionnement d'un accumulateur électrique basé sur le couple Pb-Zn.* — Prenons le cas simple d'un accumulateur constitué par une positive en plomb doux peroxydé et par une négative en zinc ou mieux constituée par un support métallique recouvert électrolytiquement de zinc, le tout plongeant dans une solution sulfurique convenable.

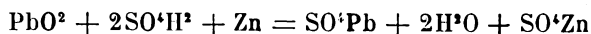
La force électromotrice d'un tel élément est, ainsi que nous venons de le voir, de 2,5 V.

Si nous fermons le circuit de cet élément, le courant allant à travers l'électrolyte, de la négative vers la positive, entraînera sur ces plaques les modifications suivantes :

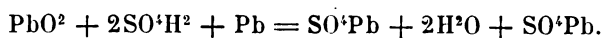
1° *Négative* : Dissolution du zinc et transformation de ce métal en sulfate de zinc sous l'action de l'acide sulfurique.

2° *Positive* : Réduction du peroxyde de plomb et transformation progressive en sulfate de plomb, suivant le mécanisme observé pour les accumulateurs plomb-péroxyde de plomb.

La réaction globale de marche est la suivante :



que l'on peut rapprocher de celle des accumulateurs au plomb :



Ces réactions sont, l'une et l'autre, réversibles.

Il y a cependant entre elles deux différences essentielles : la première résulte de la solubilité du sulfate de zinc qui entre en solution prenant peu à peu la place de l'acide sulfurique primitif, alors que le sulfate de plomb est pratiquement insoluble ; la seconde provient de ce que la négative se dissolvant, perd de la matière au fur et à mesure de la décharge, mais au point de vue chimique elle ne se modifie pas.

De ce fait, lorsque la totalité de la matière positive se trouve ramenée à l'état de sulfate de plomb, l'élément est encore susceptible de produire une force électromotrice de l'ordre de 0,8 V.

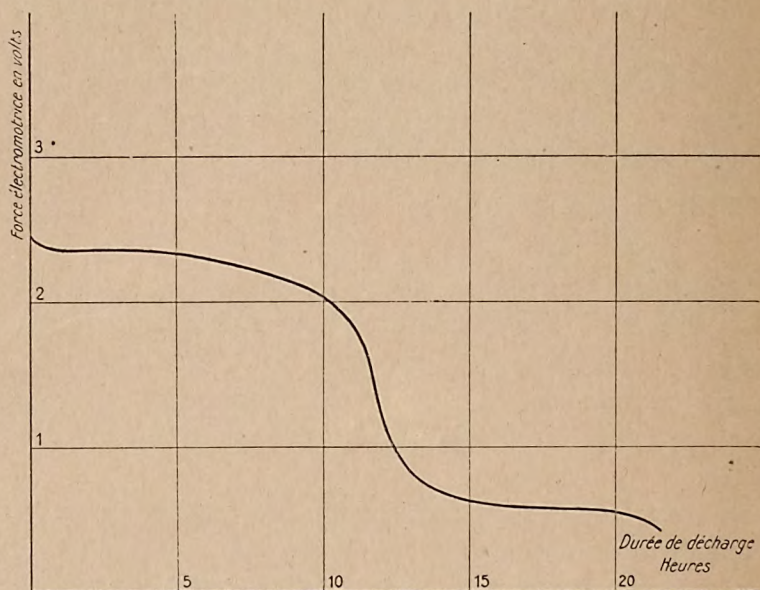


Fig. 1. — Décharge d'un accumulateur Plomb-zinc. — Variation de la force électromotrice en fonction du temps.

Sous l'action du nouveau couple sulfate de plomb-zinc, l'accumulateur est encore susceptible de fournir une quantité d'électricité qui n'est pas négligeable, mais dont l'utilisation ne peut être envisagée que dans certains cas particuliers, par suite de la faible valeur de la tension moyenne à ce moment.

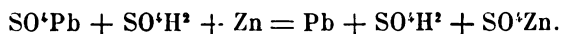
Cette phase de la décharge entraîne naturellement de nouvelles modifications sur les électrodes.

*Négative* : Dissolution d'une nouvelle quantité de zinc et remplacement, molécule par molécule, de l'acide sulfurique initial par du  $\text{SO}_4\text{Zn}$  dissout.



*Positive* : Réduction du sulfate de plomb en plomb avec régénération d'une molécule d'acide sulfurique.

La réaction globale est la suivante :



De telle sorte que si l'on pousse à fond la décharge d'un accumulateur plomb-zinc, on se trouve en présence d'une positive recouverte de plomb et d'une négative presque entièrement dépourvue de son zinc, l'électrolyte ne renferme presque plus d'acide libre, mais une solution de sulfate de zinc.

Comme la précédente, cette dernière réaction est absolument réversible.

En résumé, nous voyons que la décharge d'un accumulateur plomb-zinc s'effectue en deux phases bien distinctes :

la première comprise entre 2,5 V et 1 V et la seconde, entre 1 V et 0,5 V.

L'allure de la courbe de décharge est celle de la figure 1.

*Avantages.* — En admettant que l'on puisse construire un accumulateur basé sur le principe précédent, les avantages qu'il présenterait sur l'accumulateur actuel au plomb sont assez connus et sont en général admis sans discussion. Je les résumerai ainsi :

1° Force électromotrice de 25 pour cent supérieure, entraînant, à capacité égale, une énergie environ de 25 pour cent plus forte que dans le cas de l'accumulateur au plomb ;

2° Plaque négative plus légère puisque, théoriquement, pour un ampère heure de capacité 1,21 g de zinc remplace 3,86 g de plomb spongieux ;

3° Plaque négative indéformable, puisqu'elle n'est soumise à aucun travail mécanique ; de ce fait, le support métallique destiné à recevoir le zinc pourra être rendu très léger ;

4° Dangers de sulfatation très réduits puisque, dans le pire des cas, (décharge complète) l'électrolyte ne renferme plus d'acide libre.

En plus des avantages précédents, l'expérience montre que la résistance intérieure est très faible et que la diminution de capacité aux régimes de décharge rapides est nettement moins forte que pour l'accumulateur au plomb.

*Difficultés de réalisation.* — Tous ceux qui ont essayé de construire un accumulateur semblable se sont heurtés à deux grandes difficultés :

La première réside dans la grande solubilité du zinc dans une solution sulfurique : la négative chargée de zinc voit peu à peu celui-ci disparaître et très rapidement l'accumulateur perd sa charge.

La seconde provient de l'irrégularité des dépôts électrolytiques de zinc et de la tendance de ce métal à former des arborescences ; ces effets sont encore aggravés par le fait que dans un accumulateur, les conditions de l'électrolyse (température, densité de courant aux électrodes, etc...) sont variables avec le mode d'utilisation de l'appareil. Ces irrégularités de dépôt sont très graves car elles peuvent très rapidement établir des contacts entre positive et négative et mettre l'élément en court-circuit.

### L'ACCUMULATEUR POUCHAIN

*Constitution.* — La positive est du type homogène à grande surface et n'a de particulier que son dessin qui contribue à lui donner, sous un poids relativement faible, un grand développement de surface.

La négative est constituée par une grille en cuivre rouge de faible épaisseur, montée sur un cadre constitué par un fil de cuivre de forte section ; ce cadre contribue à augmenter la rigidité de la plaque et sert également à répartir le courant.

L'une des particularités de l'appareil réside dans le fait que la grille seule doit recevoir le dépôt de zinc à l'exclusion du cadre qui, dans ce but, est recouvert d'une matière isolante appropriée, susceptible de résister à l'action de l'acide.

L'électrolyte est constitué par une solution sulfurique à 20 B°

Les deux difficultés à surmonter étaient :

- 1° d'empêcher la dissolution du zinc à circuit ouvert ;
- 2° d'obtenir un dépôt régulier de zinc à la négative.

On parvient à empêcher la dissolution du zinc en amalgamant le dépôt de zinc initial, et en prenant certaines dispositions sur lesquelles il ne m'est pas permis d'insister, pour que cette amalgamation soit entretenue aussi longtemps que durera l'accumulateur.

Les courbes des figures 10 à 12 ci-après montrent que le zinc ainsi traité résiste, sinon complètement, mais d'une façon tout à fait satisfaisante, à l'attaque à circuit ouvert.

En ce qui concerne la régularité du dépôt, elle dépend principalement :

- 1° De la nature du métal constituant ce support ;
- 2° De la répartition de la charge électrique sur la négative ;
- 3° De la composition de l'électrolyte ;
- 4° De la pureté des substances employées.

Les dépôts électrolytiques de zinc ne se font pas aussi bien sur tous les métaux ; le cuivre est un de ceux qui se comporte le mieux ; cependant le voisinage du cuivre et du zinc en présence d'acide sulfurique peut faire craindre, dans certaines conditions, la mise en action du couple cuivre zinc et la destruction rapide de la négative ; mais je n'ai jamais constaté ce phénomène parmi tous les éléments usagés que j'ai pu avoir entre les mains.

La répartition de la charge électrique à la surface de la négative est obtenue, d'une part, par la bonne conductibilité du support et, d'autre part, par l'adoption d'un rapport convenable entre la section des barreaux de la grille et celle du cadre d'amenée de courant.

La composition de l'électrolyte a fait l'objet de recherches minutieuses et les meilleurs résultats sont obtenus pour des acidités voisines de 20 B° ; il va sans dire que la quantité de liquide doit toujours être en rapport avec la quantité de zinc portée par les négatives, c'est-à-dire avec la capacité des éléments. Il est indispensable que la quantité totale d'acide renfermée dans un élément soit inférieure à celle qui correspondrait à la dissolution complète du zinc et à sa transformation en sulfate de zinc. Enfin, indépendamment des principes précédents qui sont essentiels, certaines substances, convenablement choisies, peuvent intervenir pour régulariser les échanges électrolytiques.

En dernier ressort, il faut veiller à ce que les produits employés soient les plus purs possibles, sans cependant que cela signifie qu'un accumulateur plomb-zinc sera irréalisable en dehors de composants chimiquement purs ; il y a lieu de faire une sélection entre les impuretés qui peuvent être introduites dans les éléments : certaines d'entre elles, comme l'antimoine, le cuivre, ont une influence nettement nuisible et doivent être évitées avec le plus grand soin ; d'autres le sont moins, le fer, en particulier, ne semble pas être plus nuisible que dans les accumulateurs ordinaires au plomb.

Enfin, il faut aussi remarquer que l'emploi de séparateurs en bois, constituant dans l'élément de véritables diaphragmes, est certainement favorable à son bon fonctionnement.

COMPARAISON ENTRE L'ACCUMULATEUR POUCHAIN ET L'ACCUMULATEUR AU PLOMB AU POINT DE VUE DE LA CAPACITÉ ET DE L'ÉNERGIE SPÉCIFIQUE

Les seuls éléments Pouchain qui aient été jusqu'à ce jour construits industriellement étaient destinés à des batteries pour démarrage d'automobiles.

Supposons deux batteries de même capacité et de même tension par exemple 60 Ah, 12 V, — l'une au plomb — l'autre plomb-zinc.

La première est constituée par 6 éléments, la seconde par 5 seulement.

La batterie au plomb comporte environ 18,700 kg de plaques.

La batterie Pouchain ne comporte que 12,150 kg de plaques.

Par conséquent, pour une même énergie fournie, soit 720 Wh environ, le rapport entre les poids des plaques est de :

$$\frac{18,7}{12,15} = 1,54.$$

Autrement dit, la batterie au plomb comporte un poids de plaques de 54 pour cent plus grand que la batterie Pouchain.

Cependant, si l'on compare le poids des batteries entre elles on n'arrive pas à une différence aussi grande.

La batterie au plomb pèse 35 kg environ, la batterie Pouchain 26 kg, le rapport des poids tombe à :

$$\frac{34}{26} = 1,3$$

c'est-à-dire que la batterie au plomb est environ de 30 pour cent plus lourde que la batterie Pouchain.

Cela tient à ce que le poids des accessoires, bacs, connexions, etc... est, toutes proportions gardées, plus fort pour les batteries Pouchain que pour les batteries au plomb.

Dans le premier cas, en effet, le rapport du poids total au poids des plaques est :

$$\frac{26}{12,15} = 2,14.$$

Dans le deuxième cas au contraire, il n'est que

$$\frac{34}{18,7} = 1,815.$$

Il faut du reste remarquer que, pour des batteries de démarrage, la question poids est tout à fait secondaire.

Lorsqu'il s'agit d'éléments plus puissants, le rapport du poids de batterie au poids des plaques diminue notablement et l'élément Pouchain prend nettement l'avantage.

Au cours d'essais exécutés sur des batteries de 6 éléments plomb-zinc comportant en tout 7,600 kg de plaques et pesant au total 17,800 kg il m'a été possible d'obtenir 370 Wh pour une décharge en 5 heures,

ce qui nous donne, par kilogramme de plaques :

$$\frac{370}{7,6} = 48,7 \text{ Wh}$$

et par kilogramme d'élément complet :

$$\frac{370}{17,8} = 20,9 \text{ Wh}$$

Si nous remarquons que le rapport du poids total de l'élément à celui des plaques est de :

$$\frac{17,8}{7,6} = 2,34$$

à cause de l'importance des accessoires (caisse, connexions, bacs, etc.) alors qu'il serait de l'ordre de 1,5 seulement dans le cas d'éléments plus grands, genre traction par exemple et dans ces conditions l'énergie spécifique serait de l'ordre de :

$$\frac{48,7}{1,5} = 32,3 \text{ Wh/kg.}$$

A la suite d'essais effectués par M. Palestrino, Ingénieur à la Société Idroelettrica Piemonte à Turin, celui-ci affirme avoir obtenu avec des éléments établis spécialement en vue d'étudier les possibilités d'application à la traction électrique des accumulateurs plomb-zinc, une énergie spécifique supérieure à 40 Wh/kg.

#### QUELQUES EXPÉRIENCES EFFECTUÉES SUR DES ÉLÉMENTS POUCHAIN

*Variation de la capacité en fonction du régime de décharge.* — Une des propriétés intéressantes de ce genre d'accumulateur provient

de ce que sa capacité aux régimes de décharge rapide diminue moins vite que l'accumulateur normal au plomb ; ce phénomène devient particulièrement sensible dès que la durée de la décharge devient inférieure à 5 h.

Voici à ce sujet les résultats obtenus sur un élément de 34 Ah :

| Durée de décharge<br>en heures. | Capacité<br>en ampèreheures. |
|---------------------------------|------------------------------|
| 10                              | 34                           |
| 6                               | 31                           |
| 3                               | 28,5                         |
| 2                               | 27,5                         |
| 1,30                            | 27                           |
| 1                               | 26                           |
| 0,30                            | 24,7                         |

Si nous exprimons les capacités successives en centièmes de la capacité initiale en 10 h, nous pourrions comparer la baisse de capacité d'un accumulateur Pouchain et celle d'un accumulateur au plomb.

Nous trouvons :

| Durée de décharge<br>en heures. | Capacité en centièmes<br>de la capacité initiale. |              |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|--------------|
|                                 | Pouchain.                                         | Plomb-plomb. |
| 10                              | 100                                               | 100          |
| 6                               | 91                                                | 91           |
| 3                               | 83,5                                              | 78,5         |
| 2                               | 81                                                | 71,6         |
| 1,30                            | 79,5                                              | 66           |
| 1                               | 76,5                                              | 60,5         |
| 0,30                            | 73                                                | 45,4         |

Ces résultats sont traduits graphiquement sur la figure 2.

*Résultats obtenus après des décharges particulièrement brutales.* — Sur 3 éléments neufs numérotés 1—2—3, pris au hasard dans la fabrication normale, nous avons procédé tout d'abord à une première charge à intensité constante de 2 A suivis d'une décharge à 5 A.

Dans ces conditions, nous avons trouvé pour la capacité en ampèreheures :

|      |      |
|------|------|
| N° 1 | 22,5 |
| N° 2 | 25   |
| N° 3 | 25   |

Après cet essai, les éléments furent remis en charge à intensité constante à 3 A, puis chaque élément fut mis séparément en court-

circuit franc au moyen de câbles à forte section et laissés ainsi pendant 2 h. Ils furent ensuite mis en charge pendant 13,30 h à intensité constante de 3 A.

La figure n° 3 montre l'allure de la courbe de charge correspondant à l'élément n° 2.

Pour étudier l'influence du court-circuit, nous avons effectué une décharge des 3 éléments à 5 A et nous avons trouvé pour la capacité en ampère-heures :

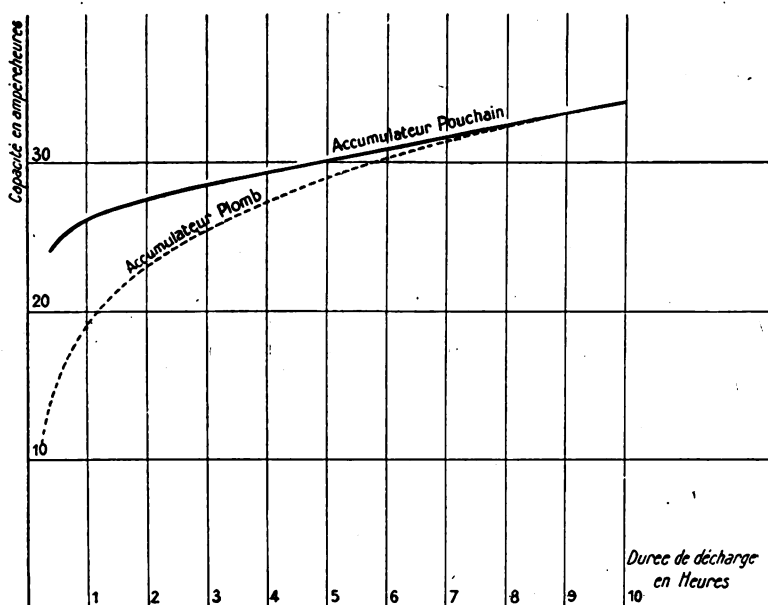


Fig. 2. — Variation de la capacité en fonction du régime de décharge d'un élément Pouchain de 34 Ah.

N° 1 ..... 19,7

N° 2 ..... 20

N° 3 ..... 20,5

Nous remarquons que les éléments ont perdu respectivement 12,5 pour cent, 20 pour cent et 18 pour cent de leur capacité initiale.

Il fut alors procédé à une nouvelle charge à intensité constante de 3 A, puis les éléments furent une deuxième fois mis en court-circuit et laissés ainsi pendant 24 h ; au bout de ce temps, les éléments furent remis en charge à intensité constante de 2 A : la charge fut assez lente et les courbes de charge présentent un aspect caractéristi-

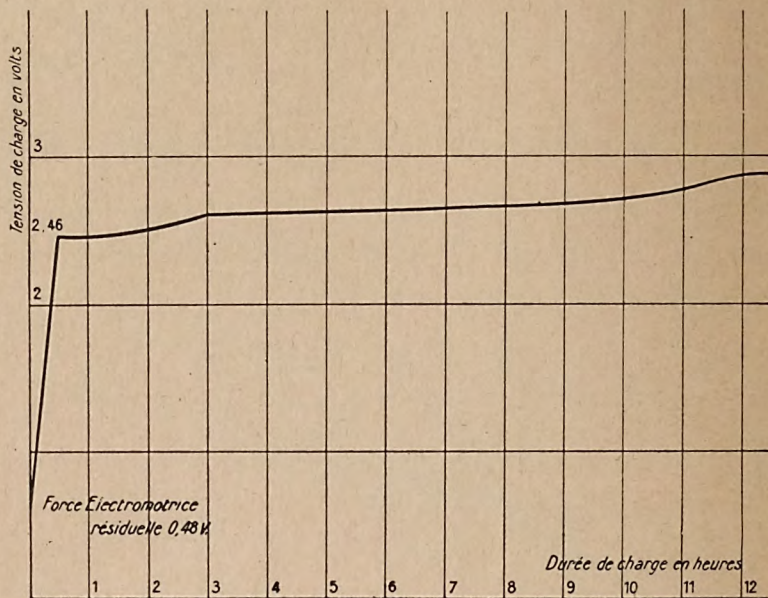


Fig. 3. — Courbe de charge de l'élément N° 2 après le court-circuit de 2 h. — Charge à intensité constante de 3 A.

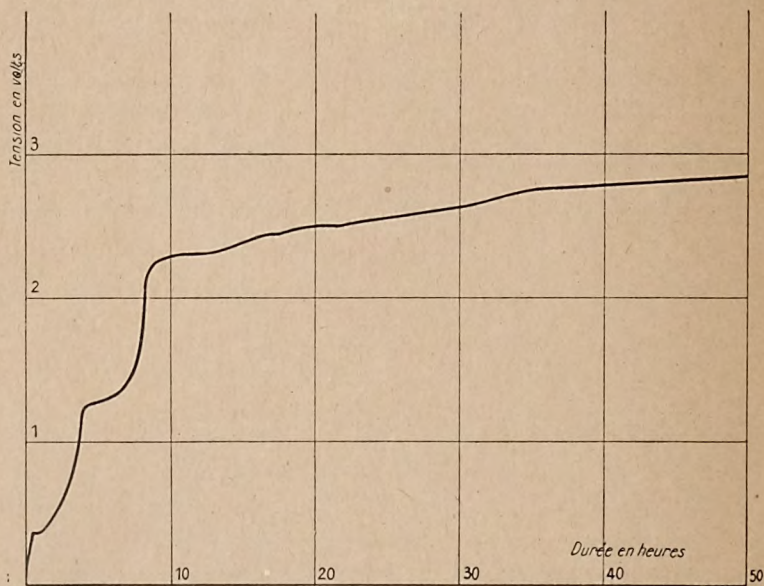


Fig. 4. — Courbe de charge de l'élément n° 1 après l'essai en court circuit de 24 h. — Intensité constante de charge 2 A.



que (figures 4, 5 et 6). Il faut tout d'abord noter que la force électromotrice des éléments après le court-circuit n'était pas absolument nulle, mais comprise entre 0,08 et 0,5 V ; au début de la charge, la tension augmente lentement de 0,5 V à 0,6 V, puis monte brusquement à 1,2 V où elle présente un court palier de 2 h environ, puis monte brusquement pour atteindre 2,3 V. A partir de ce moment, la tension croît assez régulièrement pour atteindre, à fin de charge, 2,84 ou 2,85 V. Il est à noter que pour atteindre cette valeur, la charge dut être prolongée pendant 51 h.

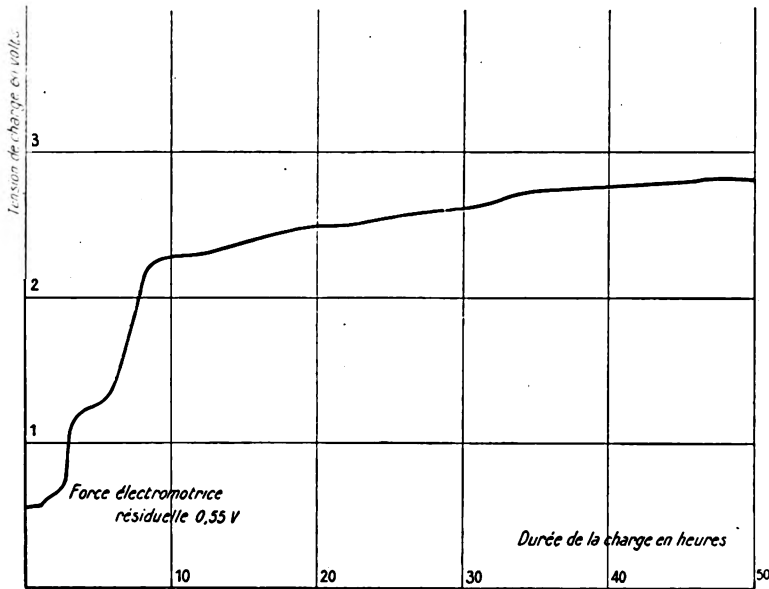


Fig. 5. — Courbe de charge de l'élément n° 2 après l'essai du court circuit de 24 h.  
— Charge à intensité constante de 2 A.

A la fin de cette charge, les éléments furent mis en décharge à 5 A, les capacités en ampère-heures trouvées sont les suivantes :

|            |      |
|------------|------|
| N° 1 ..... | 20   |
| N° 2 ..... | 20   |
| N° 3 ..... | 20,5 |

Nous pouvons remarquer, en rapprochant ces chiffres de ceux obtenus à l'essai précédent, que les capacités n'ont pas varié.

Aussitôt après, les éléments furent rechargés à 3 A, puis mis une dernière fois en court-circuit, la durée de celui-ci ayant été prolon-

gée pendant 48 h : pendant les premières minutes la température du liquide monta très rapidement et atteignit 66°C. Au bout de 48 h la force électromotrice de chaque élément était, en volts :

|            |      |
|------------|------|
| N° 1 ..... | 0,00 |
| N° 2 ..... | 0,32 |
| N° 3 ..... | 0,32 |

Les éléments furent remis en charge à 2 A. Cette opération fut poursuivie pendant 3 jours et coupée de quelques intervalles de repos (2 à 3 h) car la température de l'élément N° 2 avait quelque tendance

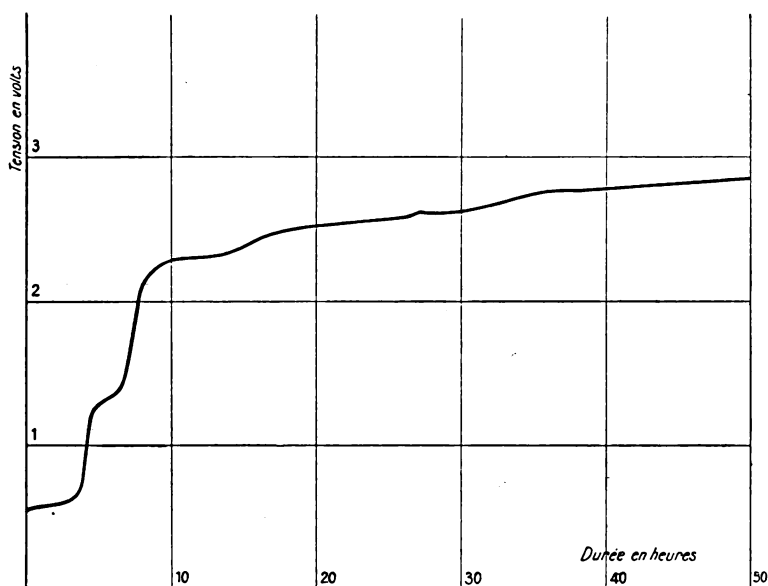


Fig. 6. — Courbe de charge de l'élément n° 3 après l'essai en court circuit de 24 h.  
— Charge à intensité constante de 2 A.

à monter (36 à 40°C) — la tension montait progressivement et la fin de la charge fut atteinte sans autre incident.

Les trois éléments furent à nouveau déchargés à 5 A. Nous avons trouvé pour les capacités en ampère-heures :

|            |      |
|------------|------|
| N° 1 ..... | 20   |
| N° 2 ..... | 17,5 |
| N° 3 ..... | 21,3 |

Les figures 7 à 9 montrent, pour chaque élément, les différentes courbes de décharge.

Nous remarquons que l'élément N° 2 semble devoir être éprouvé un peu, ce que pouvait faire prévoir l'échauffement constaté pendant la charge. Nous verrons que par la suite, cet élément s'est comporté de façon normale.

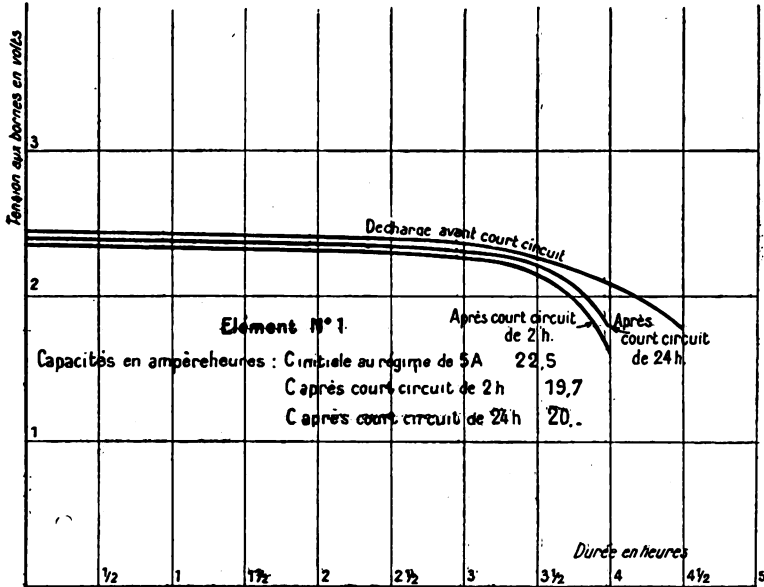


Fig. 7. — Influence de courts circuits sur un accumulateur Pouchain.

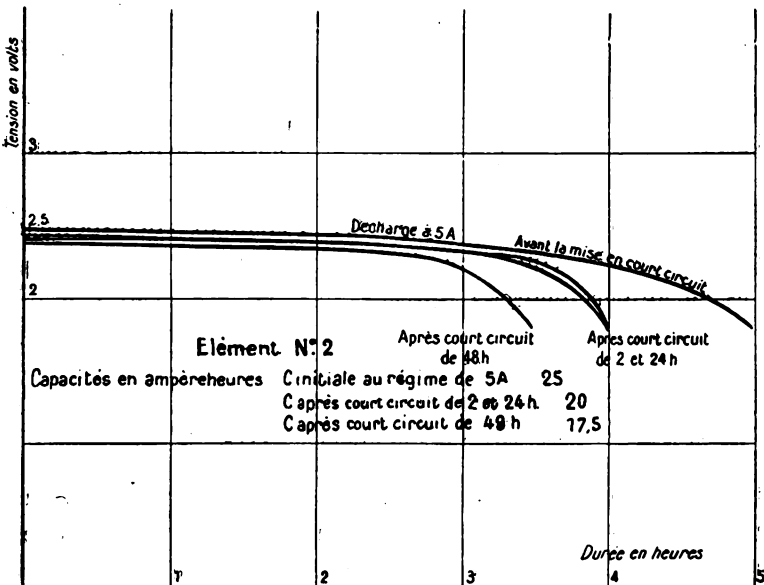


Fig. 8. — Influence de courts circuits sur un accumulateur Pouchain.

Après cette série de mauvais traitements, nous avons voulu vérifier si ces éléments conserveraient leur charge pendant une durée suffisante. A cet effet, les 3 éléments furent mis en charge à 3 A puis abandonnés à eux-mêmes pendant les nombres de jours respectifs ci-après :

|            |    |
|------------|----|
| N° 1 ..... | 12 |
| N° 2 ..... | 24 |
| N° 3 ..... | 36 |

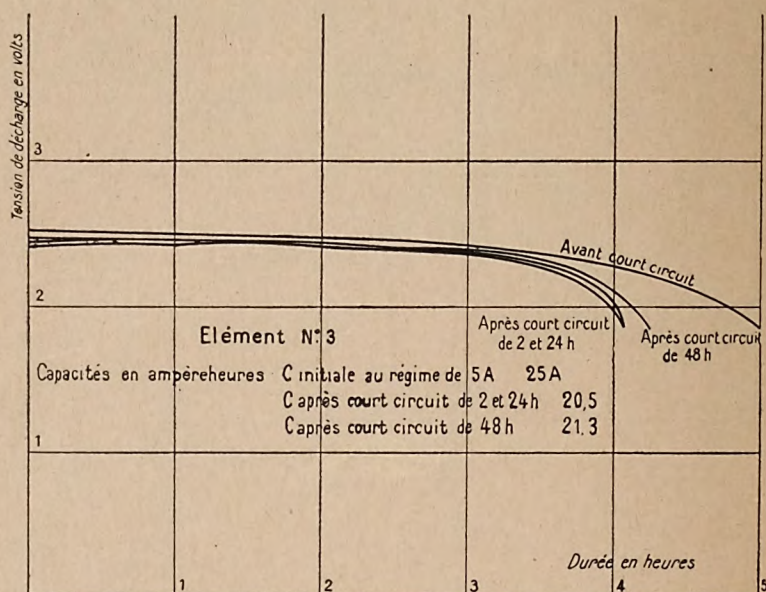


Fig. 9. — Influence de courts circuits sur un accumulateur Pouchain.

A la fin de chacune de ces périodes, l'élément correspondant fut déchargé à intensité constante de 5 A : ils ont donné les capacités suivantes en ampère-heures :

|            |       |
|------------|-------|
| N° 1 ..... | 18,75 |
| N° 2 ..... | 17    |
| N° 3 ..... | 8,75  |

Nous voyons que l'élément n° 2 a certainement repris ; une décharge de cet élément à 5 A à la suite de cet essai nous a montré que la capacité atteignait à nouveau 20 Ah. c'est-à-dire la même valeur qu'après le second essai de court-circuit.

Dans ces conditions, la perte de capacité pour chaque élément sera en centièmes de :

$$\text{N}^{\circ} 1, \text{ pour 12 jours : } \frac{20 - 18,75}{20} \times 100 = 6,25$$

$$\text{N}^{\circ} 2, \text{ pour 24 jours : } \frac{20 - 17}{20} \times 100 = 15$$

$$\text{N}^{\circ} 3, \text{ pour 36 jours : } \frac{21,3 - 8,75}{21,3} \times 100 = 58,5.$$

Ce dernier chiffre, qui est le plus défavorable, nous conduit à une perte moyenne journalière de capacité égale à 1,63 pour cent.

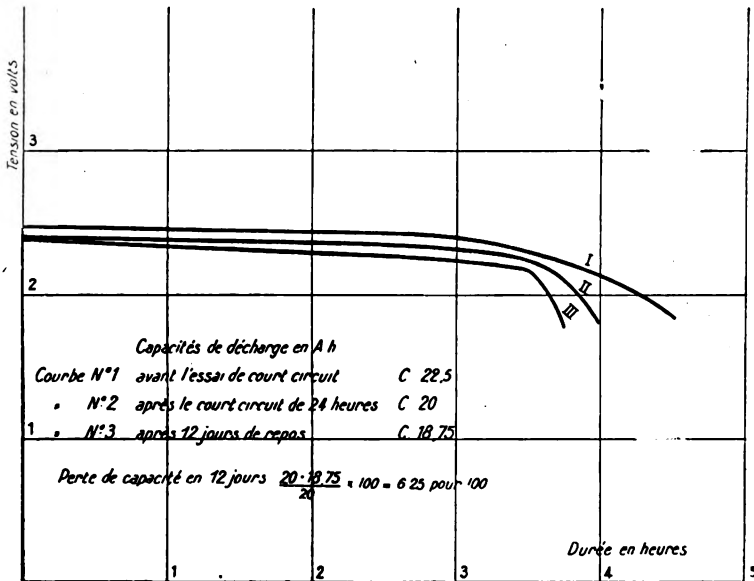


Fig. 10. — Essai de conservation de charge Élément n° 1. — (Décharge après 12 jours de repos). — Les décharges sont faites à intensité constante de 5 A.

Nous sommes, par conséquent, nettement au-dessus de ce que l'on était accoutumé de voir pour les accumulateurs plomb-zinc.

Ces résultats se déduisent des courbes des figures 10, 11 et 12.

#### EMPLOI DE L'ACCUMULATEUR POUCHAIN COMME BATTERIE POUR L'ÉQUIPEMENT D'AUTOMOBILES

C'est jusqu'à ce jour la seule application pour laquelle on possède des résultats d'ordre vraiment pratique, puisque actuellement certaines batteries, qu'il nous a été permis de suivre dans leur service,

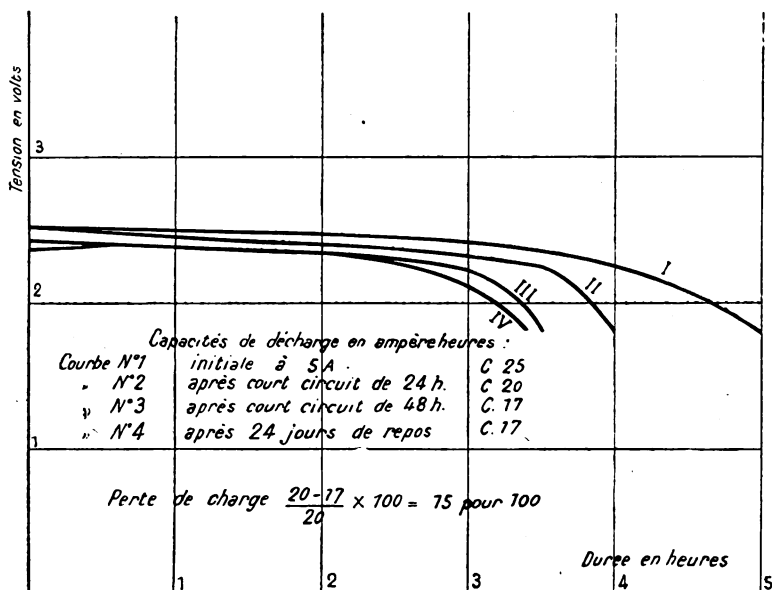


Fig. 11. — Essai de conservation de charge Élément n° 2 (Décharge après 24 jours de repos) les décharges sont faites à intensité constante de 5 A.

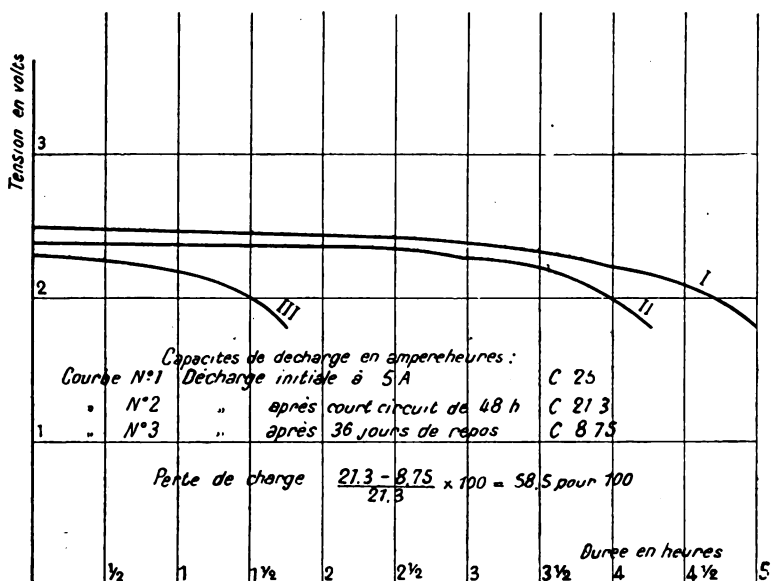


Fig. 12. — Essai de conservation de charge Élément n° 3 (Décharge après 36 jours de repos) les décharges sont faites à intensité constante de 5 A.

n'ont pas loin de 2 ans de marche et fonctionnent à l'entière satisfaction de leurs possesseurs.

Il faut dire que les propriétés de l'accumulateur plomb-zinc, en particulier sa faible résistance intérieure et sa perte de capacité réduite aux régimes de décharge très rapides, le rendent particulièrement apte à ce genre d'applications.

Cela a souvent permis de remplacer sur une voiture une batterie au plomb d'une capacité déterminée, par exemple 60 Ah, par une batterie plomb-zinc de capacité inférieure par exemple 45 Ah, et d'obtenir des résultats identiques.

Dans un premier essai on a comparé deux batteries de 12 V, l'une, composée de 5 éléments Pouchain, pesait 22 kg, l'autre, de 6 éléments au plomb, pesait 32 kg.

Les deux batteries furent soumises à une série de décharges intermittentes sur résistances à 180 A ayant chacune une durée de 10 s et coupées d'intervalles de repos de 10 s.

Dans ces conditions, la batterie au plomb a donné :

26 décharges ou 13 Ah pour une durée de décharge totale de 4,32 mn, et la batterie POUCHAIN :

38 décharges ou 19 Ah pour une durée de décharge totale de 6,34 mn.

Nous voyons par là que malgré la différence de poids, la batterie plomb-zinc a donné 12 décharges de plus que la batterie au plomb soit 45 pour cent de plus.

Si nous rapportons ces résultats au kilogramme de batterie, nous voyons que la batterie Pouchain a donné :

1,73 décharges par kilogramme contre 0,81 décharges par kilogramme pour la batterie au plomb.

La figure 13 montre la marche des deux batteries pendant cet essai.

Au cours d'un autre essai, on a comparé une batterie Pouchain de 5 éléments de 12 V pesant 22 kg à une batterie au plomb de 6 éléments de 12 V pesant 29,500 kg.

Les deux batteries furent chargées à intensité constante de 7 A pendant 6 h.

La figure 14 montre les courbes de charge des deux batteries ; on remarque sur ce graphique que la tension moyenne de charge de la batterie Pouchain est inférieure de 1,2 V à celle de la batterie au



plomb, preuve d'une résistance intérieure plus faible pour la première d'où rendement en énergie meilleur.

Après la charge, les deux batteries furent déchargées sur un moteur type démarreur d'automobile freiné pour que le courant de décharge soit sensiblement constant et égal à 160 A, les décharges ayant une durée de 10 s séparées entre elles par des intervalles de repos de 10 s.

Dans ces conditions, la batterie Pouchain donne 57 décharges et la batterie au plomb 36 décharges.

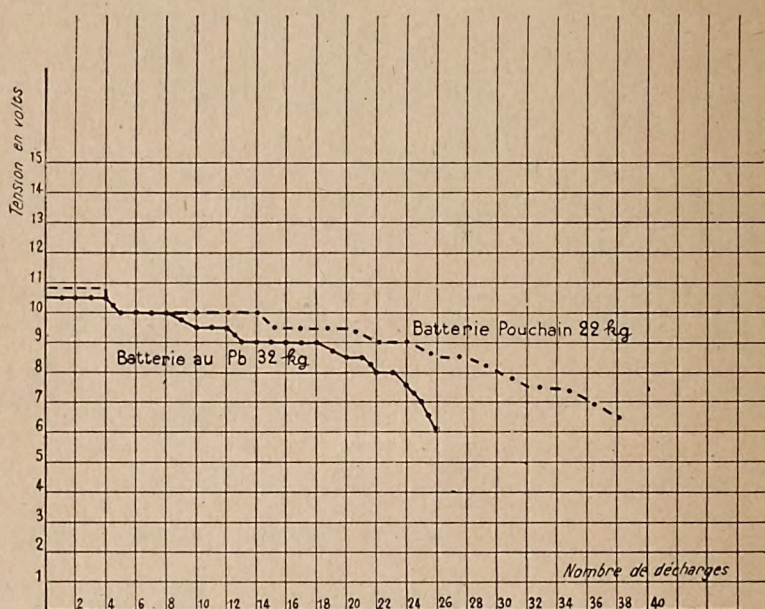


Fig. 13. — Essai pratique de démarrages.

Les résultats de ces décharges sont les suivants :

|                          | Pouchain. | Plomb. |
|--------------------------|-----------|--------|
| Durée en heures.....     | 0,1585    | 0,1    |
| Ampères fournis.....     | 160       | 160    |
| Tension moyenne.....     | 10        | 9,45   |
| Puissance moyenne.....   | 1.600     | 1.510  |
| Ampèreheures fournis.... | 25,3      | 16     |

Si nous remarquons, d'autre part, que pendant la charge il a été fourni aux deux batteries 42 ampèreheures, le rendement en quantité ressort à :

et : 60 pour 100 pour la batterie Pouchain  
38 — pour la batterie au Plomb.



L'écart considérable entre ces deux valeurs provient de ce que l'élément plomb-zinc conserve beaucoup mieux sa capacité aux régimes de décharge très rapides.

En énergie nous avons fourni pendant la charge 570 Wh à la batterie Pouchain contre 625 à la batterie au plomb.

L'écart entre ces valeurs provient de la différence entre les tensions

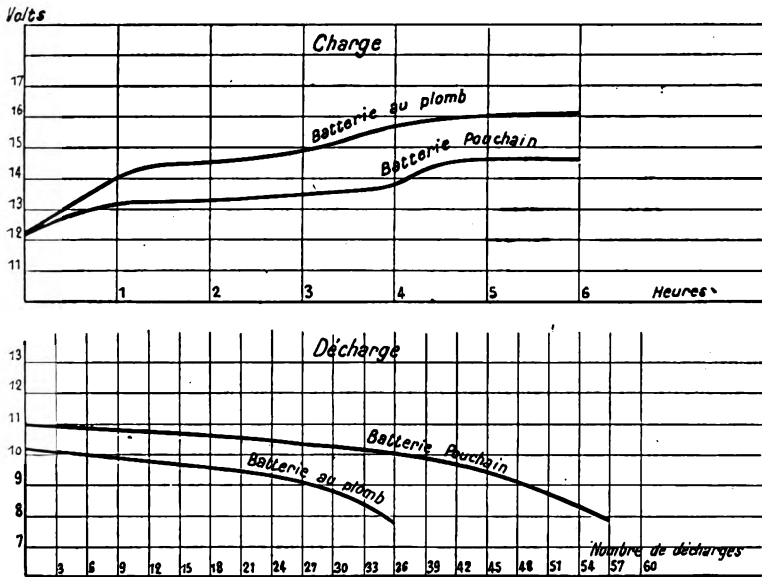


Figure 14.

|                        | Charge   |       | Décharge |       |
|------------------------|----------|-------|----------|-------|
|                        | Pouchain | Plomb | Pouchain | Plomb |
| Heures.....            | 6        | 6     | 0,1585   | 0,1   |
| Ampères.....           | 7        | 7     | 160      | 60    |
| Volts moyens.....      | 13,6     | 14,81 | 10       | 9,45  |
| Watt moyens.....       | 95       | 104   | 1600     | 1510  |
| Ampères heures.....    | 42       | 42    | 25,3     | 16    |
| Watteheures.....       | 570      | 625   | 253      | 151   |
| Poids en kilogramme... | 22       | 29,5  | 22       | 29,5  |

moyennes de charge des deux batteries, c'est-à-dire de la différence de leur résistance intérieure.

A la décharge nous avons retiré :

253 Wh. de la batterie Pouchain  
151 — de la batterie au Plomb.

Dans ces conditions, le rendement en énergie pour cet essai ressort à :

44,5 pour 100 pour la batterie Pouchain  
24,5 — pour la batterie au Plomb.

Tous les essais auxquels nous avons pu procéder contribuent à montrer que les grandes difficultés qui avaient jusqu'ici empêché la construction d'accumulateurs basés sur le couple plomb-zinc ont été surmontées ; l'expérience de quelques centaines de batteries actuellement en service sur des voitures automobiles, dont certaines depuis plus de 18 mois, prouve que cet accumulateur est maintenant sorti du domaine des laboratoires.

Il présente des qualités certaines qui doivent faire envisager son emploi dans tous les problèmes d'accumulation de l'électricité et principalement dans tous les cas où les batteries doivent être déchargées à des régimes élevés.

C'est ainsi qu'en ce qui concerne la traction électrique, il doit être susceptible d'apporter une amélioration sensible à ce qui est réalisé à ce jour. Je préfère, pour vous entretenir de cette question, attendre de pouvoir le faire sciemment, c'est-à-dire après expérience.

#### CONCLUSIONS

De l'exposé précédent, il résulte que l'accumulateur Pouchain bien que n'étant pas véritablement l'accumulateur léger dont on cherche la solution depuis si longtemps, marque cependant un progrès sur les appareils actuels puisque dans tous les cas où les décharges ont une durée comprise entre 1 heure et 5 heures, ils sont susceptibles de fournir, à poids égal, une énergie de 70 à 100 pour 100 plus grande.

Au point de vue de la robustesse des électrodes, la négative est pratiquement inusable ; la positive présente toutes les qualités de solidité et de durée des plaques à formation naturelle, elle en a aussi par son poids les inconvénients.

L'appareil est donc, sans son état actuel, capable de prendre sa place dans l'industrie et d'y faire figure honorable.

#### Discussions

M. FÉRY. — Je ne suis pas d'accord avec M. Antoine au sujet de l'équation chimique qu'il a donnée et d'après laquelle la substance positive serait, après la charge, constituée par



Il y a là une survivance évidente de la théorie classique de l'accumulateur ordinaire, théorie de laquelle mon savant ami, M. Jumau, reste partisan. mais qui est en désaccord avec les faits. De récentes expériences, effectuées à Strasbourg, ont, une fois de plus, démontré très nettement l'exactitude de la nouvelle théorie que j'ai proposée. Au surplus, celle-ci explique très bien, dans le cas de l'accumulateur Pouchain la forme de la courbe de charge que nous a montrée M. Antoine.

M. KRIEGER. — Pour faire utilement un parallèle entre l'accumulateur Pouchain et l'accumulateur au plomb. il faudrait d'abord préciser le type d'accumulateur au plomb qui est pris comme terme de comparaison. En particulier, il serait souhaitable que sa positive fût identique, au point de vue construction, à celle de Pouchain.

Il convient, d'autre part, de remarquer que les avantages de l'accumulateur plomb-zinc sont connus depuis très longtemps. Mais ces inconvénients ont-ils été supprimés ? Le principal réside dans l'énorme difficulté qu'il y a à déposer le zinc, dans de bonnes conditions, un très grand nombre de fois de suite, 300 fois par exemple.

M. ANTOINE. — Nous avons atteint 150 décharges.

M. KRIEGER. — C'est insuffisant pour la traction.

M. ANTOINE. — Nous avons des batteries de démarrage qui sont en service depuis plus d'un an.

M. KRIEGER. — Le fonctionnement de ces batteries n'est pas comparable à celui des batteries de traction. D'autre part, la résistivité d'une solution contenant du sulfate de zinc est plus grande que celle d'une solution contenant seulement de l'acide sulfurique.

M. TARRIN fait remarquer que bien qu'il soit intéressant en traction de charger rapidement, en 5 heures et même en 3 heures parfois, il serait bon de savoir aussi si la durée de l'accumulateur en question n'est pas compromise dans le cas de charges moins rapides, car on sait que le dépôt électrolytique du zinc est précisément favorisé par les densités de courant relativement élevées.

M. ANTOINE répond que les avantages de l'accumulateur Pouchain sont surtout sensibles dans le cas de charges rapides...

M. TARRIN fait ensuite observer que l'on a beaucoup parlé d'essais de court-circuit et qu'il lui semble utile de signaler qu'on est un peu

trop pessimiste pour l'accumulateur au plomb, en assurant qu'un tel accumulateur après court-circuit maintenu pendant plusieurs heures serait probablement détruit, comme vient de le dire en particulier M. Féry ; M. Tarrin relate un essai précis qu'il a effectué à ce sujet : un élément au plomb, type « Démarrage » a été déchargé en 5 heures, puis mis en court-circuit franc pendant 15 heures ; il a été alors rechargé avec un rendement satisfaisant, 80 pour cent en quantité environ ; on a ensuite mesuré sa capacité et on a retrouvé exactement la valeur initiale.

M. GROSSELIN — Certaines des objections faites tomberaient sans doute si l'accumulateur Pouchain était soumis aux essais du Laboratoire Central d'Electricité.

M. ANTOINE. — Nous n'avons fait jusqu'à présent, que des essais privés, mais nous nous soumettrons probablement dans l'avenir, à des essais officiels.

#### 4<sup>e</sup> SECTION. — APPAREILLAGE. — CANALISATIONS. — DISTRIBUTION GÉNÉRALE. — TRACTION

Président : M. DAGUERRE

SÉANCE DU 20 DÉCEMBRE 1929. — I. — M. le Colonel VIRY présente la communication suivante sur « *la protection des installations par éclateurs court-circuiteurs à disques très rapprochés.* »

Le petit dispositif que je vais vous présenter a été réalisé dans les conditions suivantes :

Les machines automatiques à recuire par induction qui seront présentées demain à la troisième Section, nécessitaient pour leur alimentation une tension constante (300 V-1 000 p:s), l'intensité du recuit étant fonction de la tension et de la vitesse de la machine. Dans ces conditions les groupes convertisseurs destinés à alimenter ces machines furent prévus avec un alternateur 1 000 p:s compoundé par une batterie de condensateurs en série. Ce montage très intéressant permet en effet d'obtenir aux bornes de l'utilisation une tension pratiquement constante et indépendante du nombre de machines en service.

La Société de Construction spécialiste en haute fréquence sollicitée pour des propositions en vue de la fourniture de tels groupes convertisseurs fit ressortir que cette solution présentait le grave inconvénient qu'en cas de court-circuits sur le réseau à 1 000 p: s ou sur l'un des récepteurs, il se produirait une surintensité dans le circuit alter-

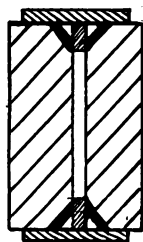


Figure 1.

nateur capacité série qui ne serait limitée que par la résistance du circuit. Cette surintensité, étant accompagnée d'une surtension très dangereuse pour la batterie et l'enroulement de l'alternateur. Elle signalait, d'autre part, que la protection par disjoncteur à maxima

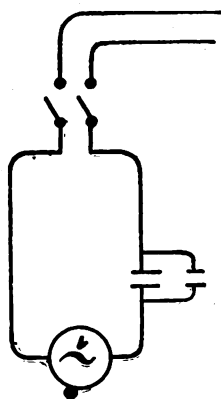


Figure 2.

serait trop tardive et qu'au premier abord la protection par un éclateur placé aux bornes de la capacité serait préférable, mais en raison de la difficulté de réglage d'un tel éclateur et de la destruction rapide des électrodes, il lui semblait préférable de renoncer à l'emploi de capacité en série.

D'ailleurs des essais effectués à ma demande par la Société firent ressortir que les surtensions étaient loin d'atteindre les valeurs que l'on aurait pu craindre grâce à l'effet de saturation se produisant dans l'alternateur, effet d'ailleurs très marqué parce que l'alternateur était du type homopolaire et que, d'autre part, la protection par éclateur ne semblait pas devoir être employée en raison du régime troublé auquel donne lieu l'éclateur une fois amorcé.

Néanmoins, une protection me paraissait nécessaire. C'est le but de l'éclateur court-circuiteur que je vais décrire. Il se compose simplement de deux rondelles d'aluminium séparées par une bague isolante, l'épaisseur de la bague est soigneusement calibrée pour que l'intervalle d'air qui sépare les deux rondelles ait une valeur bien déterminée fonction de la tension limite que l'on ne veut pas dépasser. Un manchon isolant maintient l'ensemble grâce à l'emploi d'une laque synthétique. La pastille ainsi obtenue est placée sur un support quelconque assurant la liaison des rondelles d'aluminium avec les bornes de la capacité.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant : dès que la tension aux bornes de la capacité atteint la tension limite que l'on s'est fixée, au moment d'un court-circuit sur la ligne par exemple, un petit arc jaillit entre les deux rondelles, provoque une fusion locale et instantanée des 2 rondelles et l'établissement d'un pont métallique réunissant d'une façon permanente les 2 rondelles au point où l'arc a jailli, la capacité est court-circuitée, la résonnance tombe et le courant est limité par la self-induction de l'alternateur. Le court-circuit localisé, la pastille est remplacée et l'installation peut être remise en marche.

Cet appareil utilisé depuis 1 an et demi dans une cartoucherie de la Guerre, s'est révélé comme très efficace. Les nombreux court-circuits qui se sont produits dans l'installation, soit sur la ligne, soit sur les machines réceptrices, appareillage défectueux, défauts d'isolement, tournures de cuivre se rassemblant sur les machines et venant court-circuiter les bornes des fours, etc..., ont toujours donné lieu au fonctionnement parfait de l'éclateur réalisant non seulement la protection de la batterie et de l'alternateur *mais l'étouffement du court-circuit*, évitant ainsi les dégâts qui se seraient produits inévitablement à l'emplacement du court-circuit ; les traces laissées sont souvent imperceptibles.

En résumé, l'éclateur court-circuiteur assure la sécurité de fonc-

tionnement des alternateurs à haute fréquence compoundés, par une batterie de condensateurs en série et permet ce montage particulièrement intéressant dans les applications de la haute fréquence.

J'ai ensuite pensé que ces petits dispositifs pourraient être utilisés dans la pratique courante pour la protection des appareils contre les surtensions.

Soit E l'appareil à protéger, on place aux bornes de l'appareil un éclateur court-circuiteur P réglé pour la tension que l'on ne veut pas dépasser, R est une résistance telle que la chute de tension qu'elle provoque dans le fonctionnement normal de l'appareil E soit négligeable par rapport à la tension d'alimentation, F les fusibles ou les bobines du disjoncteur. Le fonctionnement est le suivant, dès que

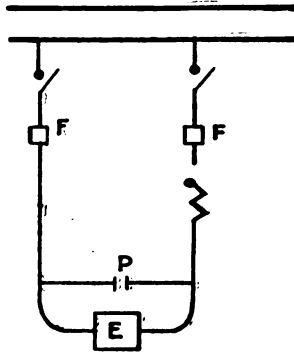


Figure 3.

la tension limite est atteinte l'éclateur fonctionne, le pont formé court-circuite l'appareil, la résistance R à deux effets, elle assure immédiatement la chute de tension aux bornes de l'appareil et elle limite le courant de court-circuit à travers l'éclateur, les fusibles ou le disjoncteur fonctionnent et isolent l'appareil. Après fonctionnement de l'éclateur, on remplace la pastille.

Le dispositif peut être appelé « fusible de tension » comme l'a proposé M. Drin. Alors qu'un « fusible d'intensité » protège un appareil contre une surintensité en provoquant la coupure permanente du circuit par fusion, le « fusible de tension » protège un appareil contre une surtension en provoquant par fusion la fermeture permanente d'un circuit de protection.

La tension disruptive d'un élément tel qu'il a été décrit n'est bien définie qu'autant que le rapport entre l'intervalle d'air et le diamètre

des plaques est faible. Pour la basse tension, l'appareil se présente sous la forme d'une pastille, mais pour des tensions élevées on serait conduit en augmentant l'intervalle d'air à augmenter également le diamètre ce qui serait incommode et donnerait lieu à des difficultés de construction. Il est plus simple de conserver à la pastille le même diamètre et à l'intervalle d'air la même épaisseur en multipliant les intervalles d'air ; l'appareil se présente alors sous la forme d'un empilage de disques métalliques séparés par des bagues isolantes de même épaisseur. Si un éclateur formé d'un intervalle d'air d'épaisseur donnée fonctionne à  $U$  volts, un éclateur de même diamètre formé de  $N$  intervalles de même épaisseur fonctionnera à  $N U$  volts.

Le fonctionnement de l'appareil tel qu'il a été décrit ne comporte aucune temporisation. Dès que la surtension se manifeste le pont conducteur permanent est établi, la protection est instantanée, mais la disjonction se produit même si la surtension est fugitive.

La temporisation peut cependant être obtenue dans certains cas ; si en particulier la résistance  $R$  est telle que l'intensité du courant de court-circuit à travers l'éclateur soit insuffisante pour provoquer la fusion des 2 plaques en un point, il s'établit à travers l'éclateur un effluve qui s'éteint avec la surtension. Le passage du courant à travers l'effluve assure la protection grâce à la chute de tension dans la résistance  $R$ , pendant tout le temps de la surtension.

M. DRIN a suggéré l'emploi des éclateurs précédemment décrits pour la protection des réseaux. La question dépasse ma compétence. Je me contenterai donc de rapporter le résultat de quelques essais.

II. -- M. ROY présente un résumé de sa communication sur *les redresseurs à vapeur de mercure* <sup>(1)</sup> de la maison Siemens.

M. VILLIERS signale que dans une fonderie de la banlieue parisienne, un redresseur en verre a été installé sur un pont roulant de 15 tonnes depuis plusieurs années. Le redresseur se comporte parfaitement bien, malgré les trépidations de toutes sortes auxquelles il est soumis.

M. GRATZMULLER rappelle qu'en 1913 il avait fait breveter un dispositif permettant d'alimenter, en courant alternatif, des moteurs à

---

(1) Un résumé de cette communication présentée à la séance mensuelle de la Société du 4 janvier et illustrée par un film détaillant la construction et la constitution des appareils, paraîtra dans un Bulletin ultérieur.



collecteur par l'intermédiaire d'un redresseur à vapeur de mercure ; les variations de la tension redressée aux bornes des moteurs étaient obtenues par variations du champ d'excitation de l'alternateur.

M. ROY répond ensuite aux différentes questions qui lui sont posées par :

M. GRATZMULLER sur la puissance des appareils : Siemens construit des redresseurs en verre de 350 A, sous 500 V et des redresseurs métalliques de 1 500 A sous 800 V.

M. GIROZ sur l'isolement de la cathode. Celle-ci est isolée à l'aide de joints en caoutchouc de la même façon que les anodes.

M. DARRIEUS sur l'avantage des anodes en graphite. Au point de vue refroidissement le graphite rayonne mieux que les métaux.

M. P. GIRAULT sur les surtensions et l'absence de dispositif de protection. On ne constate pratiquement aucune surtension sauf par basse température.

M. PORNIN sur la vérification des joints. Quant une fuite se produit, il est nécessaire de vérifier séparément tous les joints et de les resserrer, s'il y a lieu.

## 5<sup>e</sup> SECTION. — TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE. — TRANSMISSION PAR ONDES

Président : M. REYNAUD-BONIN

SÉANCE DU 29 NOVEMBRE 1929.— I. — M. GOHOREL présente une communication sur « *le Système de téléphonie automatique de la Compagnie des Téléphones Thomson-Houston* » (1). Il montre que ce système est d'un fonctionnement tout à fait sûr.

M. LE PRÉSIDENT. — Ce système comporte un certain degré d'enregistrement réalisé par le marquage des chiffres à l'appel. Il présente d'ailleurs les avantages du découpage à volonté des sélections et de sa faible inertie laquelle le rend précieux sur les longues lignes. Mais le fait qu'il n'assure pas l'enregistrement complet doit peut-être rendre difficile son application dans les grandes villes à plusieurs bureaux centraux, surtout s'il doit coexister avec des appareils manuels et avec des positions lumineuses.

---

(1) Cette communication sera présentée ultérieurement en séance publique.

M. GOHOREL. — On peut considérer le commutateur de contrôle comme un enregistreur partiel, mais on peut aussi admettre que l'on se rapproche des systèmes dans lesquels les impulsions sont reçues par le sélecteur lui-même. Le cas de la liaison entre un Bureau manuel et un Bureau automatique se présente à Lyon (Strowger). Il y est résolu sans faire appel à un enregistrement compliqué. Il est vrai qu'il n'y a, à Lyon, qu'un seul bureau manuel, mais le fonctionnement peut rester le même quel que soit le nombre des manuels.

M. LE PRÉSIDENT. — Je crois cependant que l'enregistrement complet avec traduction est nécessaire dans une très grande ville avec beaucoup de bureaux.

M. GOHOREL. — C'est exact ; il faut d'ailleurs un enregistreur complet du numéro d'appel puisqu'il peut y avoir plusieurs appels en attente ; on y arriverait dans notre système par l'emploi d'appareils très simples, comprenant 4 commutateurs qui reçoivent les numéros et 3 relais seulement.

M. LE PRÉSIDENT. — Un commutateur de contrôle est affecté à un groupe de sélecteurs. Ceci est admissible lorsque le trafic est peu intense, mais, dans le cas contraire, le système ne manque-t-il pas de souplesse ? Car on est alors amené à augmenter le nombre des sélecteurs dans chaque groupe.

M. GOHOREL. — Le nombre des commutateurs de contrôle varie avec celui des communications ; le temps d'occupation d'un commutateur est indépendant de la durée de ces dernières et cette durée est généralement la même quel que soit le réseau. En pratique, le nombre de sélecteurs par commutateur varie de 10 à 20.

M. LE PRÉSIDENT. — Ce système constitue en somme un intermédiaire entre l'enregistrement complet et le tout relais.

M. GOHOREL. — La sélection se pratique encore plus rapidement avec les relais mais la durée est dans les deux cas très courte.

M. LE PRÉSIDENT. — Vous avez signalé la particularité que présente votre système de permettre à volonté l'entraînement au rochet et l'entraînement continu. Cette remarque paraît très intéressante.

II. — M. Lucien KRIEGER présente la communication ci-après sur les *courroies transporteuses sélection multiple et leurs applications dans les centraux télégraphiques et téléphoniques*.

L'échange des papiers entre divers services ou postes disposés dans un même immeuble a intérêt à être réalisée mécaniquement.

La liaison directe de chacun des postes avec tous les autres peut, dans certains cas, être réalisée d'une façon simple. En général, il est plus avantageux d'avoir recours à un poste qui centralise les papiers et les aiguille vers leurs destinataires.

En particulier dans les centraux téléphoniques interurbains les demandes de communications sont reçues par des opératrices qui libel-

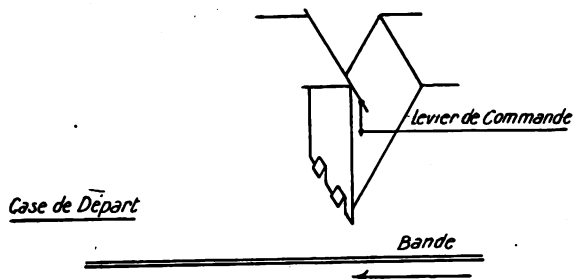


Figure 1.

lent des fiches et s'en remettent aux soins de distributrices pour les faire parvenir à l'opératrice desservant les circuits demandés.

Dans les centraux télégraphiques, les télégrammes reçus sur les appareils sont à distribuer dans la localité où à transmettre sur d'au-

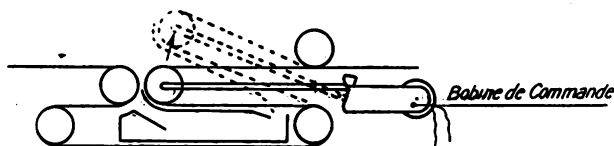
Disposition d'un sélecteur

Figure 2.

tres postes. Un organisme central est chargé de les trier et de les diriger convenablement.

Le problème de la manutention mécanique est double : 1° un dispositif de concentration vers une table de tri centrale ; 2° un dispositif de répartition sur les postes à partir de la table de tri.

Une façon simple de réaliser le dispositif de concentration consiste à mettre à portée des agents un transporteur à bande sans fin auquel

les papiers sont confiés par simple dépôt. La bande aboutissant à la table de concentration les y dépose. Le transporteur à bande a, sur d'autres systèmes, l'avantage d'un débit illimité et d'un fonctionnement silencieux.

Des agencements spéciaux simples lui permettent de se plier aux

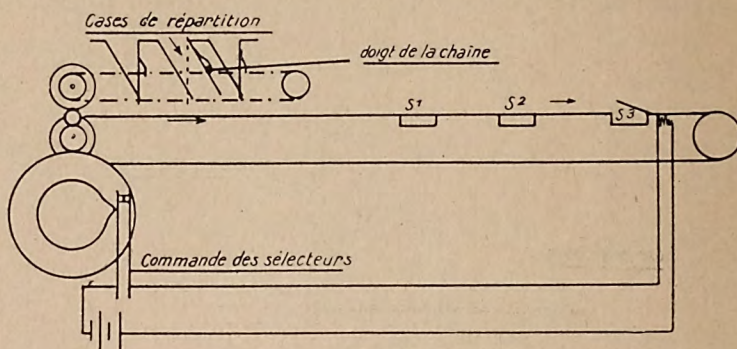


Figure 3.

exigences de la disposition relative des postes et de la configuration des locaux.

Les courbes dans un plan horizontal sont obtenues par plusieurs procédés, quant aux trajets verticaux, ils sont assurés par emprisonnement des papiers entre deux bandes animées de vitesses égales.

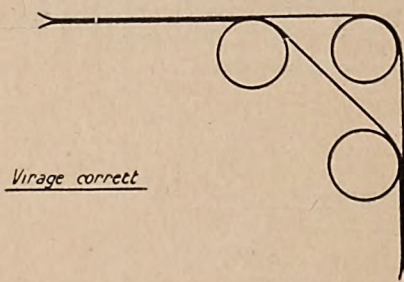


Figure 4.

Le problème de la distribution sur les postes à partir de la table de tri, nécessite en principe, autant de transporteurs que de liaisons à établir. Quelques systèmes à pinces sélectrices de fabrication étrangère ont été essayés sans grand succès.

Il est intéressant d'utiliser le brin de bouclage des bandes de con-

centration pour effectuer la distribution en groupant ces liaisons sur un même organe transporteur.

Le système consiste à envoyer successivement au moyen d'un organe répartiteur les papiers destinés à chacun des postes sans qu'il puisse y avoir mélange et à les recueillir par des organes sélecteurs dont la commande est effectuée par l'organe répartiteur, avec un décalage fixe pour chacune des postes. Ce décalage étant déterminé par la distance séparant le poste d'émission du poste de réception.

Pour que le système soit possible, deux conditions sont nécessaires :

1° L'organe répartiteur doit être en liaison fidèle avec le mouvement de translation de la bande ;

2° Les papiers ne doivent subir aucun glissement sur la bande pendant le transport.

Le répartiteur est constitué par un certain nombre de cases affectées chacune à une liaison. Ces cases sont constituées de telle façon qu'une commande mécanique leur permet de déposer leur contenu sur la bande. La commande est une chaîne portant un doigt qui détermine successivement l'ouverture des cases pendant le temps nécessaire à leur vidage. Cette chaîne au moyen d'organes démultiplificateurs est liée au mouvement de la bande, toute variation de vitesse de la bande donnera donc bien lieu à une variation de vitesse de la chaîne. Deux passages successifs du doigt de la chaîne devant une même case déterminent le cycle d'envoi. Le cycle de réception est comparable au cycle d'envoi, un arbre porte-came fait un tour pendant un cycle.

Il y a autant de cames qu'il y a de sélecteurs, ces cames manœuvrent des interrupteurs qui assurent au moyen de circuits électriques la commande à distance des sélecteurs.

Le décalage entre le vidage de la case et l'ouverture du sélecteur correspondant dépend de la distance qui les sépare, comptée sur la bande.

Il est à remarquer : 1° qu'un nouvel envoi pour un même poste peut se faire avant la réception de l'envoi ou des envois précédents ; 2° que le mouvement est indépendant de la présence des papiers ; 3° que rien ne limite le nombre de postes possibles que la période d'envoi.

Une réalisation du système a été effectuée au central interurbain de Lille

Un transporteur à bande concentre sur une table de tri les fiches provenant des annotatrices.

4 réseaux sélecteurs à bande sans fin assurent la répartition des tickets à 100 opératrices interurbaines groupées deux par deux.

Les réseaux sont à 12 ou 13 directions, les périodes d'envois de 35. La vitesse de translation des bandes de un mètre à la seconde.

Les réseaux sont disposés sous le marchepied du multiple avec transporteurs annexes de liaison entre les sélecteurs et les tables d'opératrices.

Les réseaux entre la table de tri et la partie installée sous le marchepied du multiple passent au plafond des salles inférieures, où sont disposés également les moteurs à raison de 3 par réseau (moteurs de 0,25 ch).

Cette première installation a donné lieu à une mise au point pénible.

Si le système sélecteur a toujours fonctionné parfaitement, le réseau de bouillisterie par contre sur lequel il y avait accumulation de dispositifs nouveaux, ne réalisait qu'imparfaitement le transport fidèle des fiches. Ce réseau est constitué par deux bandes disposées en nappe horizontale accolées l'une avec l'autre pour assurer aisément les trajets verticaux et la soustraction des fiches à l'effet des courants d'air.

La mise au point du fonctionnement mécanique correct a été réalisée rapidement, un phénomène nouveau a retardé considérablement la mise en service du système.

La vitesse de translation de 1 m/s n'avait encore jamais été réalisée (actuellement on réalise 1,50 m sans difficulté) et des phénomènes d'électricité statique non constatés jusqu'alors s'opposaient à la libre rentrée des fiches dans les sélecteurs.

Les phénomènes électriques existaient bien antérieurement, mais l'accroissement de la vitesse de translation, le fonctionnement dans une atmosphère à degré hygrométrique très faible en hiver, les ont fait apparaître nettement.

Il a d'abord été tenté de décharger les fiches au moyen de peignes, de balais, d'humidification, d'atmosphère ozonisée, etc.

Des essais systématiques de laboratoire ont conduit à la remarque, que s'il était impossible d'éviter complètement une charge de la bande même en la faisant glisser dans une gouttière métallique à la masse, et en la faisant passer sur des rouleaux à la masse alternativement

sur une face, puis sur l'autre (disposition des sélecteurs) une fiche posée sur une bande fortement chargée ne prenait elle-même qu'une charge minime non gênante, mais que s'il y avait déplacement de la fiche par rapport à la bande la charge augmentait dans des proportions considérables.

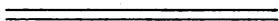
Le réseau de Lille était établi conforme aux installations antérieures (sans sélection et à vitesse lente 0,45 m/s). Les conversions sur les rouleaux ne réalisaient qu'imparfaitement le cheminement correct de deux bandes accolées.

En effet, la bande enveloppante tend à acquérir une vitesse supérieure à celle de la bande enveloppée. Pour cette raison l'épaisseur des bandes était choisie aussi faible que possible, mais pour un parcours de 30 m environ, le glissement du ticket par rapport à l'une ou l'autre des bandes n'était pas négligeable.

Il n'a été possible de mettre en service les transporteurs sélections de Lille qu'en éliminant le phénomène de glissement au moyen de l'artifice suivant : faire virer les deux bandes sur des rouleaux distincts de façon qu'elles n'aient de contact ensemble qu'en parcours rectiligne.

La fidélité du transport étant réalisée et les phénomènes d'électricité statique, n'étant plus gênants, les résultats sont devenus excellents et le dernier perfectionnement introduit permet de considérer que le système de transporteur à sélection par bandes sans fin est sorti de la période de mise au point, et qu'il entre dans une phase industrielle.

Ce système de manutention est économique au point de vue du prix d'établissement et du prix de revient de son exploitation puisqu'il remplace un certain nombre de transporteurs par un seul il apporte une contribution nouvelle à l'industrie naissante en France des transporteurs mécaniques de bureaux.



# OUVRAGES OFFERTS

## A LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

APPAREILLAGE. — CANALISATION. — TRACTION.

Protection of Electrical Circuits and Equipment against Lightning U. S. department of Commerce bureau of Standards. Une brochure 19×12 cm, 107 pages.

FORMULAIRES. — AIDE-MÉMOIRE. — MANUELS.

Handbuch der Experimentalphysik de l'Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H. de Leipzig (25 tomes), acheté sur la fondation Loutreuil. Marks 854,35.

RECHERCHES PHYSIQUES. — APPAREILS DE MESURE.

The Propionic acid Bacteria, par C.-B. VAN NIEL. Un vol. broché de 27×20 cm, 190 pages. (Don de l'Université de DELFT, Hollande).

Sur la formation des acétates cycliques de la glycérine au moyen de l'acétal, par D.-J. VAN ROO. Thèses pour Docteur, envoi de la Faculté de DELFT.

Contrôle et mesure de l'efficacité des traitements par le chlore, par HOLVERDO K. Thèses pour Docteur, envoi de la Faculté de DELFT.

Etudes analytiques au sujet des combinaisons de quelques graisses imparfaitement connues, par VAN LOON. Thèse de doctorat, faculté de DELFT.

Equilibre de la Constitution de la matière, par KLINKENBERG A. (Thèse pour doctorat, don de la faculté de DELFT).

Principes scientifiques de l'Electrotechnique. Traduction d'après la 6<sup>e</sup> édition allemande, auteur G. BÉNISCHKE. Edité par Albin Michel, 22, rue Huyghens, Paris. Un ouvrage relié 24 1/2×16 cm, 702 feuilles. (Don de l'Editeur).

Traité de Physique générale et expérimentale Mécanique-Chaleur, année 1930, de JULES LEMOINE et AUGUSTE BLANC. Edité par Léon Eyrolles, 3, rue Thenard, à Paris. Un ouvrage broché 25×16 1/2 cm, 861 pages, 711 gravures. (Don des Editeurs). Prix 100 francs.

La décharge électrique dans le vide et dans les gaz, par MAURICE LEBLANC et MAURICE LEBLANC fils. Edité par J.-B. Baillière et fils, 19, rue Hautefeuille, à Paris. Un ouvrage broché 23×15 cm, 1929, 375 pages. (Don des Editeurs).

L'Ancienne et la nouvelle théorie des Quanta, par EUGÈNE BLOCH. Edité par Hermann et Cie, 6, rue de la Sorbonne, Paris. Un ouvrage broché, année 1930, 25×16 1/2 cm, 417 pages, 41 figures. (Don des Editeurs). Prix 90 francs.

COMMÉMORATIONS.

50 Jahre Elektrotechnischer Verein 1879-1929. (Don de M. Paul Janet.)

DIVERS.

Den Polytekniske Laereantsalt, par LUMDBY J.-T. Edité par J. Kommission Hos. G. E. G. Gad Kobenhavn. 1929. Un volume broché de 30×20 cm, 492 pages, année 1929. (Don des Editeurs).

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens, 14, avenue Pierre-Larousse, de 14 à 18 heures, tous les jours, sauf le dimanche.



## BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

---

### PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ.

**La Vapeur.** — Album publié par la SOCIÉTÉ FRANÇAISE des Constructions **BABCOCK et WILCOX.** Un volume 19×27 cm de 240 pages et 255 phototypies (Don de la Société Française des Constructions Babcock et Wilcox).

Cet album, luxueusement édité et illustré, est consacré à la description des chaudières multitubulaires Babcock et Wilcox. Dans les premiers chapitres on rappelle les propriétés de la vapeur d'eau et les phénomènes qui accompagnent sa production dans les chaudières, notamment dans les chaudières Babcock et Wilcox.

Les surchauffeurs, les économiseurs, les réchauffeurs d'air font l'objet d'études spéciales très détaillées.

Le chapitre consacré à l'étude de la combustion traite de l'emploi des combustibles, notamment du charbon pulvérisé, et contient une description des foyers; il mentionne les chaudières de récupération et signale l'application de la distillation à basse température.

La grille mécanique Babcock et Wilcox est décrite dans un chapitre spécial.

L'utilisation de la vapeur à haute pression, l'épuration des eaux d'alimentation, la conduite et l'entretien des chaudières, des surchauffeurs et des grilles mécaniques, les installations ayant pour objet l'alimentation en combustible, l'évacuation des mâchefers sont également étudiés dans cet intéressant ouvrage.

### ELECTROCHIMIE.

**Technische Elektrochemie,** von Professor Dr. KURT ARNDT, A. O. Professor an der technischen hochschule in Berlin. Un volume 16,5×26 cm de 708 pages et de 438 figures. — 1929. — Prix broché : 52 Rm, relié, 55 Rm. Editeur : Ferdinand Enke, à Stuttgart (Don de l'Editeur).

Ce cours d'électrochimie comprend neuf parties :

La première traite de la production et de la mesure de l'énergie électrique.

La deuxième de la fabrication du carbure de calcium, des ferro-alliages, ferro-silicium, ferro-chrome, ferro-manganèse, ferro-aluminium, etc., des carbures de silicium, des aciers électriques, des électrodes au charbon et au graphite.

La troisième partie des électrolyses ignées : aluminium, magnésium, calcium, lithium, beryllium, cadmium, etc.; et la quatrième des électrolyses aqueuses : cuivre électrolytiques, affinage des métaux précieux, zinc électrolytique, antimoine, nickel, fer électrolytique.

### TRANSMISSIONS PAR ONDES.

**A la conquête des ondes.** La T. S. F., par Paul BRENOT, avec une préface du général Ferrié, de l'Institut. Un volume 15×20 cm de 148 pages, 2 gravures hors texte et 7 clichés dans le texte — 1929 —. Prix broché : 6 fr. Editeur : Librairie Plon, 8, rue Garancière, Paris (6°). (Don de l'auteur.)

Il ne semblait pas possible de bien faire comprendre les phénomènes de la radio-électricité qui sont à la base des radiocommunications sans recourir au calcul mathématique. Le Commandant Brenot a pourtant résolu brillamment ces difficiles problèmes, et, dans un livre qui est un véritable chef-d'œuvre de clarté et de précision, le collaborateur du Général Ferrié, l'ancien chef du centre radiotélégraphique de Paris et des Services de T. S. F., du ministère des Colonies, le Président actuel du Syndicat des Industries radioélectriques a donné une lumineuse explication physique de ces phénomènes en ne faisant appel qu'à des notions très élémentaires.

d'électricité et en procédant, ainsi qu'il le dit lui-même dans l'avant-propos de l'ouvrage, comme si le lecteur « ne connaissait rien et n'était pas disposé à apprendre un cours ? »

Dans la première partie de l'ouvrage, il cherche à expliquer les phénomènes généraux employés dans les radio communications, et il conclut que l'homme est jusqu'à présent impuissant à asservir l'éther. Dans la seconde partie il retrace à grands traits les étapes de la radioélectricité d'Ampère, Maxwell, Hertz, Branly, Marconi, puis de la téléphonie sans fil à la transmission des images, à la télévision et aux films parlants. Le dernier chapitre ouvre le champ aux plus brillantes anticipations : la T. S. F. accroîtra le rendement de la vie, créera plus de bien-être sur terre.

La préface du Général Ferrié souligne, avec une netteté impressionnante, la valeur de ce remarquable ouvrage.

### RECHERCHES PHYSIQUES.

**Newton, Maupertuis et Einstein.** — Réflexions à propos de la Relativité, par F. PRUNIER, un fascicule 14,5×22,5 cm de 80 pages et quelques figures. 1929. Prix broché : 12 fr. Editeur : Librairie Scientifique Albert Blanchard, 3 et 3 bis, place de la Sorbonne, Paris (5°). (Don de l'Editeur.)

L'Auteur, ne voyant qu'une simple coïncidence dans l'accord, considéré au point de vue quantitatif, des formules de la théorie de la relativité et des résultats de l'expérience, tient ces formules comme quantitativement exactes et s'efforce de montrer que l'on peut rendre compte, par un appareil mathématique semblable à celui de la relativité, de tous les phénomènes où l'on peut voir des vérifications de cette théorie. Les formules demeurent les mêmes, les procédés de calcul aussi, mais le langage dans lequel on les établit et on les met en œuvre est celui de la science classique : il est possible d'effectuer une traduction simple de la mécanique de la relativité dans la mécanique rationnelle, dont elle peut apparaître comme un chapitre.

Les divers chapitres de l'ouvrage sont les suivants :

- I. — Essai d'une dynamique newtonienne des champs de force naturels.
- II. — Entrainement possible de l'éther.
- III. — Phénomènes électromagnétiques dans les systèmes de corps en mouvement.
- IV. — Essai d'une physique de l'éther.
- V. — Traduction du langage de la relativité dans le langage de la mécanique ordinaire.
- VI. — La conservation de la forme des lois de l'éther.
- VII. — Réflexions sur le principe de la relativité.

**Structure de l'atome, tourbillon d'éther et Pensées scientifiques indépendantes,** par L. CUGNIN, Ingénieur des Arts et Manufactures. — Un volume 15,5 × 23,5 cm de 183 pages et quelques figures. — 1928 —. Edité par l'auteur, L. Cugnin, à Saint-Mars de Locquenay (Sarthe). (Don de l'auteur.)

L'auteur conçoit la matière comme formée de tourbillons atomiques d'éther; l'éther étant constitué par des grains très denses, d'une ténuité extrême, animés d'une grande vitesse constante lui communiquant une rigidité et une élasticité égales à celles de l'acier, car, selon lui, « l'éther immobile est la grande erreur de la Science » et l'enchaînement des phénomènes d'évolution d'où résulte le champ de gravitation existant entre les astres du monde solaire est le fait de la condensation de l'éther, des tourbillons atomiques. Quant à « la gravitation newtonienne, elle est une résonance d'impulsions élémentaires de condensation des éléments du milieu.

En se basant sur ces hypothèses, il expose ses idées *personnelles* sur la « structure de l'atome », sur la « genèse de l'atome de la lumière, de la chaleur et du champ électromagnétique » sur « le rayonnement d'énergie de l'astre, la liaison et la détente des molécules gazeuses », le potentiel et le champ thermodynamique sur la gravitation newtonienne.

**La mécanique des quanta**, par George BIRTWISTLE. Fellow of Pembroke College Cambridge (England), traduction augmentée de 4 appendices par les traducteurs : M. Ponte, ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure, agrégé-préparateur à l'Ecole Normale Supérieure, et Y. Rocard, ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure, Agrégé de l'Université, Docteur ès Sciences. Préface de M. Hadamard, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France et à l'Ecole Polytechnique. Un volume 16,5 × 25 cm de 333 pages 40 figures. 1929. Prix : 75 fr. Editeur : Librairie Scientifique Albert Blanchard, 3 et 3 bis, place de la Sorbonne, Paris (5<sup>e</sup>). Don de l'Editeur.)

Dans la préface de l'ouvrage, M. Hadamard, en constatant le caractère troublant des conceptions actuelles de la Physique et « la rapidité folle » avec laquelle elles évoluent... évoque cet adage : « Si vous traitez de sujets transcendants, soyez transcendentement clairs ». Il rappelle que la notion de quanta doit son origine aux contradictions soulevées par l'application du théorème de l'équipartition de l'énergie aux phénomènes du rayonnement ; que le dit théorème a perdu de son universalité et qu'il y a tout lieu de croire que les électrons qui s'agitent à l'intérieur d'un solide n'ont pas, à beaucoup près, la part d'énergie à laquelle il leur donnerait droit ; et cependant, la théorie des quanta a trouvé mille confirmations diverses pendant que s'éclaircissait peu à peu ce qu'il y avait en elle de paradoxal et d'assez difficilement acceptable *à priori*.

Pour un développement d'idées délicates et hardies tel que celui auquel nous assistons depuis quelques années, il est souhaitable que des exposés « transcendentement clairs » soient fournis même s'ils n'embrassent pas toute la science, mais n'en donnent qu'un instantané.

Cet exposé d'un moment de la Science, capable non de faire tout comprendre mais d'éclaircir tout ce qu'il est possible d'éclaircir actuellement, MM. Ponte et Rocard l'ont cherché dans le dernier ouvrage qu'ait écrit (1927), G. Birtwistle.

Ce n'est pas, bien entendu, qu'il ne faille supposer le lecteur averti de toutes les « théories anciennes », celles qui ont trois ou quatre ans de date. Ce serait beaucoup lui demander si on ne lui rafraîchissait la mémoire par de multiples références bibliographiques : MM. Ponte et Rocard ont eu soin de compléter les indications anglaises par d'autres renvoyant à des ouvrages français ou traduits en français.

Birtwistle a tenu à rappeler les faits expérimentaux les plus essentiels, ceux que nous révèlent la spectroscopie, la déformation des spectres sous l'influence du champ magnétique, les spectres des rayons X.

Après l'exposé de ces faits, et de beaucoup d'autres résultats expérimentaux d'ordres divers, c'était une tâche vraiment ardue de mettre en évidence d'une manière concise et claire l'esprit des principales théories émises à ce sujet : les conceptions quelque peu formelles de Heisenberg et de Dirac, celles plus concrètes et par cela même plus séduisantes de Louis de Broglie et de Shrödinger.

« Il y avait aussi à faire succéder aux principes les applications, à commencer par la toute récente théorie des perturbations de Heisenberg où les deux catégories de méthodes, celles de la Physique Mathématique et celles de la mécanique céleste se marient si curieusement.

On doit être reconnaissant à Birtwistle de la synthèse qu'il nous fournit de tout cela. »

Depuis l'apparition du livre de Birtwistle la Science a quelque peu marché et quelques mises au point sont déjà utiles, c'est ainsi que la toute récente conception de l'électron tournant est déjà dépassée, et que la théorie électronique des métaux de Drude est quelque peu bouleversée. On trouvera en Appendice l'exposé de ces nouvelles théories.

## IL Y A TRENTE ANS

---

Réunion ordinaire mensuelle du 4 avril 1900

---

Présidence de M. Eug. SARTIAUX, Vice-Président

M. P. VILLARD fait une communication sur les rayons cathodiques et les rayons de Roentgen.

La propagation rectiligne des rayons cathodiques est mise en évidence par l'expérience de la croix, de Crookes. M. Villard montre qu'ils sont déviés par un champ électrique ou par un champ magnétique, et qu'ils se comportent en cela comme les trajectoires de projectiles chargés négativement. D'autre part, les effets réducteurs nettement caractérisés qui se produisent dans les corps frappés par les rayons cathodiques amènent M. Villard à supposer que les projectiles cathodiques sont constitués par de l'hydrogène.

Il montre que la cathode reçoit quelque chose qui peut être arrêté par un diaphragme et qui peut être repoussée par un corps chargé positivement : c'est un afflux de matière chargée positivement, arrivant avec une vitesse très grande et échauffant la cathode qui l'arrête ; cet afflux positif passe au travers d'une cathode perforée, en toile métallique par exemple : ce sont les « Kanalstrahlen » de Goldstein.

Le conférencier décrit ensuite les rayons X découverts par Roentgen en 1895 et obtenus en interposant un obstacle sur le trajet des rayons cathodiques ; il parle du rayonnement de l'uranium et des sels d'urane découverts par Becquerel en 1896, puis du polonium, du radium et de l'actinium de M. et Mme Curie et Debierne.

M. Villard termine sa remarquable conférence en présentant quelques grammes de composés radifères, qui constituent une source de lumière spontanée n'exigeant aucune source auxiliaire d'énergie.

M. MASCART, Président pour la seconde fois, rappelle les débuts de l'organisation du Laboratoire Central et de l'Ecole Supérieure d'Electricité. Il souligne le succès de l'Ecole dont le nombre des élèves s'est élevé de 12 à 84 en 5 ans, remercie les conférenciers, ainsi que les bienfaiteurs de la Société.

BULLETIN  
DE LA  
SOCIÉTÉ FRANÇAISE  
DES  
ÉLECTRICIENS

---

SOMMAIRE

---

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du Samedi 1<sup>er</sup> Mars 1930, p. 466.  
Admissions des Membres titulaires, p. 466.  
Dons à l'Ecole Supérieure d'Electricité, p. 468.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Le développement de l'électricité et l'évolution des conceptions scientifiques (M. PARODI), p. 470. — Quelques réflexions sur l'emploi des mathématiques en électricité industrielle et scientifique (M. PARODI), p. 491. — Oscillographe cathodique transportable à développement synchronisé (MM. DEMONTVIGNIER et TOULY), p. 506. — Les méthodes modernes de nickelage (M. BALLAY), p. 545. — Extraction électrolytique de l'étain et du cuivre des déchets de bronze (M. O. SCARPA), p. 572.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 580.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 581.

IL Y A TRENTE ANS, p. 588.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.  
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4<sup>e</sup> série, tome X, n° 105.

# COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

---

## RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 1<sup>er</sup> Mars 1930

---

Présidence de M. PARODI

La séance est ouverte à 16 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

- Astorgis** (Raymond, Paul), Représentant Electricité et Métallurgie, 44, rue Albert-Petres, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Ledieu et L. Rousseau.
- Bourdy** (Jean), Chef d'Exploitation, Société des Forces électriques de la Vallée de Garvannie, à Luz-Saint-Sauvour (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Berthet et L. Rousseau.
- Boutron** (Charles), Ingénieur, service technique. — Constructions Electriques de France, usine de Tarbes, 61, rue Brauhauban, à Tarbes (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Sicard et L. Rousseau.
- Brisebois** (Eugène, Julien), Ingénieur-électricien, diplômé de l'Université de Lille. — Directeur de l'Ecole Nationale professionnelle de Tarbes, rue Gaston-Dreyt, à Tarbes (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Delasalle et Ledoux.
- Brom** (Mlle Charlotte), Ingénieur à la Société des Moteurs Gnome et Rhône, 14, rue Antoine-Roucher, à Paris (16<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Chaumat et Grosselin.
- Dalbanne** (René, Jean, François, Louis), Ingénieur à l'électricité de Marseille, 5, rue des Tonneliers, à Marseille (Bouches-du-Rhône). — Présenté par MM. Poujol et Bargeton.
- Delor** (Mlle Alice, Emma), Ingénieur aux Ateliers Carpentier, 7 bis, rue Bausset, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Chaumat et Grosselin.
- Dopagne** (Raymond), Directeur de la Société Pyrénéenne du Silico-Manganèse, à Pierrefitte-Nestalas (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Berthet et Perraud.
- Dourthe** (Yves, Jean, Charles), Représentant de la Société d'Equipement des Voies Ferrées et des Grands Réseaux Electriques à Bordeaux, 2, rue Marceau, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Ledieu et L. Rousseau.
- Fauconnier** (Marcel, Eugène), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Directeur des Travaux neufs (Chemin de fer métropolitain), 50, avenue Charles-Floquet, à Paris (7<sup>e</sup>). Présenté par MM. P. Martin et R. Pornin.
- Fournier** (Henri), Directeur général adjoint, Société Anonyme des Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Rouvière et Lejeune.
- Fraenkel** (Paul, Hermann), Professeur, University of Western, Perth (Australie Occidentale). — Présenté par MM. Janet et Marie.

**Furaud** (Jacques), Ingénieur aux Constructions Electriques de France, 14, Cours Gambetta, à Tarbes (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Sicard et Ledoux.

**Gachet** (Raymond), Directeur d'Agence, Société Electro-Câble, 18, Chemin de la Tremblède, Le Bouscat (Gironde). — Présenté par MM. Lacharme et Ledieu.

**Gachet** (Gaston), Ingénieur à la Société « Le Carbone », Région Sud-Ouest, Villa le Castillet, à Toulouse Saint-Simon (Haute-Garonne). — Présenté par MM. Delasalle et L. Rousseau.

**Gianinazzi** (Paul, Pierre), Ingénieur-électricien, 10, rue Prudent, à Angoulême (Charente). — Présenté par MM. Lacharme et Ledieu.

**Guizard** (Paul, Jean), Ingénieur E. S. E. de l'Union Electrique industrielle, 26, rempart de l'Est, à Angoulême (Charente) — Présenté par MM. Chenevier et Lacharme.

**Guilhem** (João, Carlos, Henrique), Ingénieur au Laboratoire de la « Saô Paulo Tramway Light and Power Co. Ltd », 21, rua Vergueiro, à Saô Paulo (Brésil). — Présenté par MM. de Souza et da Silva.

**Heckert** (Robert), Vice-Président de la Compagnie Thomson-Houston, 173, boulevard Haussmann, à Paris (8<sup>e</sup>). Domicile : 89, avenue Henri-Martin, à Paris (16<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Rey et Grosselin.

**Huldschiner** (Gottfried), Directeur de la Société Algem. S. A. (concessionnaire français de l'A. E. G. de Berlin), 6, rue Lamennais, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.

**Joly** (Auguste, Elysée), Ingénieur en chef du Service technique de la Compagnie du Chemin de Fer Métropolitain de Paris, Ingénieur civil des Mines, 32, avenue de Pontoise, à Epinay-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. P. Martin et R. Pornin.

**Judlin** (Georges), Directeur des Usines d'Electricité et de Tramways de Metz, 37 ter, avenue de Nancy, à Metz (Moselle) — Présenté par MM. Steinmann et Texier.

**Ladevèze** (Didier, Dominique), Ingénieur à la Société d'Equipeement des Voies Ferrées et des Grands Réseaux Electriques, 92, cours du Médoc, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Ledieu et L. Rousseau.

**Lehmann** (Arthur, Jean, Jacques). — Elève à l'E. S. E., 45, rue Auguste-Dumont, Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Levassort** (Maurice, Pierre, Charles), Ingénieur-électricien, 22, rue Lacrosette, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Meunier et Cabet.

**Luthy** (Emile), Ingénieur en chef du Service hydraulique aux Constructions électriques de France, 102, rue de Pau, à Tarbes (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Sicard et Ledoux.

**Maillefort** (Lucien, Georges, Louis), Ingénieur au Service Technique de « l'Aluminium Français », 23 bis, rue de Balzac; Domicile: 5, rue Bardinet, à Paris (14<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Thielmans et Girault.

**Margand** (François, Marius), Ingénieur-Civil des Mines, ingénieur divisionnaire à la Société des Houillères de Montrambert et de la Béraudière, à Saint-Etienne. — Présenté par MM. Grosselin et Jouvion.

**Milhaud** (André), Ingénieur principal au Réseau Electrique de la Région Lilloise, 5, quai du Wault, à Lille (Nord). — Présenté par MM. Gosselet-Witz et Jamouillet.

**Millet** (Jacques), Elève à E. S. E., 22, rue Cortot, à Paris (18<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Ulrich et Le Duc.

**Abdul Haque** (Mohammad), Docteur ès-sciences, 13, rue du Sommerard, à Paris (6<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Nicolmi et Montois.

**Parenteaud** (Roger, Louis), Directeur de l'Union Electrique Industrielle, Ingénieur E. E. G., 23, Rempart Est, à Angoulême (Charente). — Présenté par MM. Chenevier et Lacharme.

**Payen** (Pierre, Ingénieur E. C. P., Directeur de l'Usine des Lampes de T. S. F., de la Compagnie des Lampes, 9, rue Alexandre-Pilleaud, à Ivry-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Ayral et Maisonneuve.

**Petitmengin** (Georges, Léopold, Edmond), Ingénieur, sous-chef du Service Electrique de la Compagnie des Chemins de Fer d'Orléans, 95 bis, Quai de la Gare, à Paris (13<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Barillot et Cardon.

**Roche** (Louis), Ingénieur A. et M. et E. S. E., 34, boulevard Ledru-Rollin, à Perthis (Vaucluse). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Savary** (Maurice, Léon, Raymond), 1, boulevard des Petites-Carmes, à Limoges (Haut-Vienne) — Présenté par MM. Kupper et Rousseau.

**Septier** (Eugène, Emile), Ingénieur E. S. E., Directeur de l'Agence de Lille de la Société Industrielle des Téléphones, 33, boulevard Delesalle, à Lille (Nord). — Présenté par MM. Gosselet-Witz et Jamouillet.

**Soissons** (Omer), Ingénieur Gérant du Bureau de Lille de la Société Oerlikon, 1, boulevard de la Liberté, à Lille (Nord). — Présenté par MM. Gosselet-Witz et Jamouillet.

**Tarrin** (Maurice, Nicolas, Antoine), Ingénieur E. P. C. I., Chef du Laboratoire de la Société pour le travail Electrique des métaux, 44, avenue d'Argenteuil, à Asnières (Seine). — Présenté par MM. Fery et Boucherot.

**Thibier** (Francis), Ingénieur-Conseil, Administrateur-Délégué de la Société Petits Moteurs Electriques, Représentant à Paris des Anciens Etablissements Jacquet Frères, 62, avenue de Clichy, à Paris (18<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Guilbert et Tourneur.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. LE PRÉSIDENT fait part des dons suivants faits à l'E.S.E. :

- a) de M. *Guinochet* : un nouveau don de 55.000 francs ;
- b) de la *Maison Bréguet* : 2 moteurs Boucherot à double cage ;
- c) de la *Société Paris-Rhône* : 3 dynamos à 3 balais, 4 conjoncteurs-disjoncteurs.

Il adresse à ces généreux donateurs les remerciements de la Société.

M. VASSILLIÈRE-ARLHAC présente les *nouveaux oscillographes de M. Blondel*. Il expose l'historique de l'oscillographe dont la théorie et les premières réalisations furent présentées en 1892 par M. Blondel.

Il rappelle les principaux travaux de M. Blondel : déformations des ondes de courant dans les alternateurs (1902) ; inscription de la parole (1902) ; fonctionnement des disjoncteurs (1904) ; arc chantant (1905) ; émissions par étincelles musicales en T. S. F. (1907) ; phénomènes acoustiques (1912) ; oscillographe utilisé en analyse harmonique (1917) ; redressement des courants alternatifs par l'arc ; enregistrement des surtensions, etc...

Il présente le nouvel oscillographe portatif de M. Blondel et il indique les avantages et les applications de cet appareil.



M. GRATZMULLER estime que cette réalisation des Ateliers Carpentier est particulièrement heureuse et lui souhaite le grand succès qu'elle mérite.

M. GIRARD pose quelques questions à M. Vassillière-Arlhac au sujet de l'étalonnage des films, et de la fréquence maximum, qui peut atteindre 12 000 p.s.

M. CELLERIER, qui a utilisé le premier type du nouvel oscillographe, prévoit pour cet appareil des applications très nombreuses, en dehors même du domaine de l'électricité, par exemple en acoustique.

M. LE PRÉSIDENT remercie M. Vassillière-Arlhac de son très intéressant exposé et joint ses éloges à ceux qui ont été décernés au nouvel oscillographe ; cette dernière mise au point d'une des plus précieuses inventions de M. Blondel fait le plus grand honneur à notre éminent collègue.

M. GASQUET présente sa communication sur *les applications de la traction électrique aux poids lourds*. Il expose les avantages de la traction à accumulateurs pour les camions et les divers véhicules électriques, leurs applications et leur développement en France et à l'étranger.

M. GRATZMULLER fait remarquer que pour les poids très lourds, les avantages de la traction électrique sont encore plus accentués : changements de vitesses plus faciles, manœuvres plus précises, efforts instantanés plus intenses.

M. LE PRÉSIDENT remercie vivement M. Gasquet de sa communication.

La séance est levée à 18 heures.

---

# LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ ET L'ÉVOLUTION DES CONCEPTIONS SCIENTIFIQUES <sup>(1)</sup>

par M. Hippolyte PARODI

---

## SOMMAIRE

*Les mécaniques relativistes et quantiques en cours d'évolution comme seconde approximation d la mécanique naturelle de notre Univers. Mécaniques quantiques d'Heisenberg — Max Born Dirac mécanique ondulatoire de de Broglie — Schrödinger..*

*La mécanique atomique atomique et le principe d'indétermination d'Heisenberg. la mécanique statistique et le principe classique de causalité.*

Nous vivons un moment particulièrement important de l'Histoire de la Science parce que la physique moderne et plus spécialement l'Electricité, par une série ininterrompue d'admirables découvertes, nous a révélé un Univers nouveau qui ne peut plus s'inscrire dans le domaine des théories classiques.

Bien des vieux principes, véritables idoles scientifiques que nous adorions depuis notre enfance, ont dû être abandonnés et considérés comme caducs sans que, malgré l'effort génial d'une foule de chercheurs et la grandeur du travail déjà accompli, les principes universels, sur lesquels doit reposer la science nouvelle, aient pu être mis sous une forme entièrement satisfaisante.

Les développements parallèles, mais inégalement rapides de la physique expérimentale et de la physique mathématique, ne permettent pas encore d'aboutir à une représentation analytique unique, homogène et complète de l'ensemble des phénomènes naturels actuellement connus ; la voie est cependant tracée et tout porte à croire que les fondations de la nouvelle mécanique physique sont bien près d'atteindre le terrain solide.

Nombre d'entre nous, élevés dans l'admiration des belles théories de Newton, de Fresnel, d'Ampère, où les lois physiques se déduisaient par des calculs impeccables de principes nettement définis, éprouvent

---

(1) Communication présentée à la séance du 1<sup>er</sup> février 1930 de la Société Française des Electriciens.

un véritable malaise devant l'apparente confusion et l'extrême variété des théories modernes.

Mais il faut bien comprendre que nous ne cherchons pas maintenant une explication particulière de tel ou tel groupe de phénomènes, mais une discipline assez large pour être valable dans toute l'étendue de notre domaine phénoménal, permettant de définir, aussi bien le mouvement des astres dans le ciel que celui des électrons dans l'atome; Einstein et Planck ont su nous conduire par des voies ouvertes par l'expérience, à une compréhension plus haute du monde et ils nous ont montré, l'un dans le domaine du très grand, l'autre dans le domaine du très petit, que tout dans l'Univers était fini et absolu, aussi bien la vitesse de la lumière que le grain d'action mécanique.

Il n'existe, dans la nature, ni de système de signalisation instantané à vitesse de transmission infiniment grande, ni de système mécanique évoluant d'une façon continue décomposable en éléments d'action infiniment petits : la mécanique nouvelle, dont l'expérience impose l'édification, doit dépendre, sous sa forme pratique et directement utilisable, des constantes universelles  $c$  et  $h$ ,  $c$  vitesse de la lumière dans le vide ( $3 \cdot 10^{10}$  cm/sec.) et  $h$  quantum d'action <sup>(1)</sup> ( $6,55 \cdot 10^{-27}$  erg. cm). L'introduction de ces constantes universelles caractéristiques de notre Univers réel ou phénoménal est imposée maintenant par un ensemble de faits expérimentaux et de considérations générales qui ne peuvent laisser de doute sur le rôle fondamental qu'elles doivent jouer dans la nouvelle mécanique physique.

La mécanique classique, qui est incompatible avec l'électromagnétisme, ne peut plus être considérée que comme une *première approximation* de la Physique rationnelle correspondant au cas limite d'existence d'une vitesse de signalisation infiniment grande et d'une quantité d'action infiniment petite : La *seconde approximation* de la Physique rationnelle sera précisément constituée par la mécanique physique nouvelle, relativiste et quantique que l'on est en train de mettre au point.

Mais, au delà de ce stade non encore tout à fait parcouru, les recherches profondes d'Einstein et de ses continuateurs nous en font entrevoir beaucoup d'autres. Les perspectives nouvelles qui s'offrent à

---

(1) On sait que l'action mécanique ou Hamiltonienne a les dimensions d'une énergie multipliée par un temps ou, ce qui revient au même, celle d'une quantité de mouvement multipliée par une longueur.

nous nous montrent notamment, au moins comme *troisième approximation*, une mécanique quantique et unitaire permettant de comprendre, dans une explication commune, les phénomènes de la gravitation et ceux de l'électromagnétisme.

Il paraît utile d'insister ici sur la différence profonde qui existe entre les théories Einsteinniennes de l'Univers et les autres théories physiques en cours d'évolution ; les premières sont, par essence même, absolues et rigoureuses puisqu'elles définissent la structure géométrique de notre Univers considéré comme un tout, en laissant à l'expérience le soin de définir la répartition des masses Newtonniennes et Laplaciennes qu'elles supposent connue. Les autres théories sont plus humaines, plus pratiques ; elles traitent localement chaque problème local, ne s'élevant du particulier au général que par la constatation de la coïncidence de plusieurs explications élémentaires.

Je me propose d'indiquer ici sommairement comment les Physiciens qui croyaient, à la fin du  $xix^e$  siècle, que les phénomènes se déroulaient en fonction d'un temps absolu dans un Univers continu suivant les règles d'un déterminisme rigide, ont été peu à peu amenés par le développement de la théorie des quanta et des théories de la relativité, à envisager le Monde sous un aspect nouveau, caractérisé par la relativité du temps, la discontinuité de l'action mécanique et une indétermination, peut-être seulement formelle, des phénomènes élémentaires.

#### LA MÉCANIQUE RELATIVISTE ET QUANTIQUE

La mécanique nouvelle, deuxième approximation de la physique rationnelle, conçue principalement en vue de l'explication des phénomènes optiques et électromagnétiques, semble pouvoir être édifiée en s'inspirant soit des méthodes traditionnelles de la mécanique classique, soit de celles de l'Energétique et de la mécanique statistique.

La méthode classique consiste à établir les lois des mouvements élémentaires supposés connaissables et à trouver par intégration les lois des mouvements d'ensemble.

La méthode statistique considère les mouvements élémentaires comme inaccessibles à l'expérience et admet qu'il est inutile de les définir entièrement pour arriver à la connaissance des phénomènes observables par nos sens grossiers.

Jusqu'au début du  $xx^e$  siècle, on pensait que la discipline classique,

adoptée depuis Galilée et Newton, devait suffire à expliquer le monde ; certains phénomènes comme ceux du rayonnement, qui n'avaient pu encore recevoir d'interprétation rationnelle par application des principes classiques, étaient considérés comme devant rentrer plus ou moins rapidement dans la règle commune. Le premier coup de hache dans l'édifice classique a été porté par Max Planck, à la fin de 1900, quand il montra que les résultats expérimentaux, obtenus dans l'étude du corps noir et représentés par la formule de Wien, ne pouvaient s'expliquer qu'en admettant une « quantification de l'Energie », c'est-à-dire la discontinuité de l'émission ou de l'absorption des vibrations lumineuses.

Le corps noir, c'est-à-dire le corps susceptible d'absorber toutes les radiations quelles que soient leurs fréquences, a un rayonnement en-

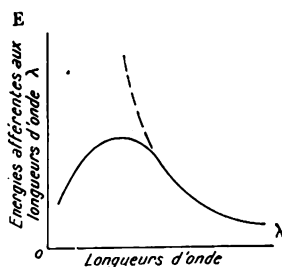


Figure 1.

tièrement défini à une température donnée qui peut être représenté, d'après les résultats expérimentaux par la courbe tracée en trait plein sur la figure 1 : cette courbe donne, pour chaque intervalle de fréquence, la valeur de l'Energie rayonnée. Sur la même figure est tracée en pointillé la courbe de Lord Rayleigh représentant la loi de variation telle qu'elle devrait exister conformément aux théories classiques. Ces deux courbes sont d'allures tout à fait différentes et elles s'écartent d'autant plus que les longueurs d'onde sont plus petites. Max Planck a obtenu une formule représentant très exactement la courbe expérimentale de Wien, en admettant que l'action Hamiltonienne ne varie pas d'une façon continue et que, pour chaque longueur d'onde, l'Energie rayonnée est proportionnelle à la fréquence, la constante de proportionnalité  $h$  représentant le quantum d'action  $E = h\nu$  ou un multiple entier  $n$  de ce quantum,  $E = nh\nu$ .

Cette hypothèse de Planck a été confirmée depuis 30 ans, d'une façon complète par toutes les recherches faites dans le domaine atomique et plus spécialement par l'étude des raies spectrales.

Einstein et Debye ont pu notamment montrer que cette hypothèse permettait d'obtenir la loi *exacte* de variation de la chaleur atomique avec la température (loi dont la règle de Dulong et Petit n'était qu'une expression approchée).

La constante de Planck apparaît chaque fois qu'il y a échange d'Energie entre ce que nous appelons encore matière et ce que nous appelions autrefois éther : La matière, qui n'est que de l'Energie localisée, est évidemment caractérisée par la nature des mouvements internes de ses éléments comme le prouve l'analyse spectrale tout entière : chaque corps simple ou composé possède une série de fréquences vibratoires qui lui est propre et toute l'optique moderne n'est autre chose que l'étude théorique et expérimentale des réactions de tels systèmes vibrants les uns sur les autres.

Il apparaît dès maintenant que, dans cette voie, les lois de l'optique nouvelles vont déborder de plus en plus du domaine physique dans le domaine chimique, au fur et à mesure du développement de la mécanique quantique.

L'optique semble devoir traiter presque exclusivement des transformations d'un système d'ondes ou d'électrons au passage d'un système matériel disposé de manière à provoquer des phénomènes de diffusion, de diffraction, de dispersion, etc. ; mais, quel que soit le phénomène considéré, les mouvements vibratoires internes de la matière réagissent sur le mouvement du train d'ondes ou d'électrons incident de manière à mettre en évidence le rôle des fréquences propres du système matériel.

Les phénomènes de dispersion anormale, les changements de fréquence qui se produisent dans un faisceau diffracté (effet Compton) ou dans un faisceau diffusé (effet Raman) démontrent d'une façon indiscutable cette action sélective ou plus exactement combinatoire.

Mais, partout, le quantum d'action de Planck se retrouve avec le caractère d'une constante universelle définissant, dans le domaine atomique, les échanges d'Energie entre systèmes vibrants.

On s'explique ainsi comment Einstein, ressuscitant sous une forme nouvelle la théorie de l'Emission, ait introduit dans la science la notion de Photon « élément de mouvement ondulatoire » sans support

matériel possédant une énergie  $h\nu$  et une quantité de mouvement  $\frac{h\nu}{c}$ .

$h$  constante de Planck,

$\nu$  fréquence de vibration du Photon,

$c$  vitesse de la lumière.

Le Photon d'Einstein, qui se déplace avec la vitesse de la lumière, contient pour ainsi dire en germe le Point source de Louis de Broglie ou onde-électron qui peut se déplacer à une vitesse quelconque.

Le « point source », de Louis de Broglie, est un électron associé à un système d'ondes pilotes à fréquences distribuées assez voisines les unes des autres pour qu'il existe une vitesse de groupe au sens que Lord Rayleigh a donné à ce terme dans sa théorie du son.

Suivant la manière dont on le considère, le point source apparaît comme un mobile ou comme un train d'ondes, de même que les phénomènes lumineux apparaissent sous forme de *rayons lumineux*, en optique géométrique (émission), ou sous forme d'*ondes* dans l'optique électromagnétique (ondulation). De Broglie et Schrodinger ont montré comment cette dualité d'aspect peut se concilier avec les lois fondamentales de la mécanique classique ; le principe de Maupertuis peut, en effet, être considéré comme une conséquence du principe de Fermat, puisque les trajectoires possibles d'un point mobile dans un champ constant coïncident avec les rayons du train d'onde que définit le principe de Fermat.

On sait que la conception initiale de L. de Broglie sur la constitution de l'électron a reçu des confirmations expérimentales très intéressantes telles que celles de Davisson et Germer, G.-P. Thomson, etc..., et il semble bien que le point source ou l'électron de de Broglie puisse être assimilé à un système d'ondes pilotes dont la vitesse de groupe serait égale à celle du point source.

Il me paraît intéressant de rapprocher cette conception de de Broglie de celle d'Hugoniot relative au mouvement d'un projectile dans un fluide : D'après Hugoniot, la propagation d'une discontinuité finie se fait suivant des lois différentes de celles d'une perturbation infinitésimale et le sillage d'un projectile est formé par un ensemble d'éléments du fluide mis dans un état tel que la vitesse de propagation du son dans ce sillage soit précisément égale à celle du projectile. Il y a là une analogie frappante susceptible de développements sur laquelle nous nous proposons de revenir ultérieurement.

La première tentative sérieuse d'édification d'une mécanique atomique a été faite en 1913, par Niels Bohr, quand il a introduit la notion de niveaux d'Energie quantifiés dans la définition du modèle d'atome de Perrin-Rutherford. Ce modèle est constitué, comme on sait, par des cortèges d'électrons circulant autour d'un noyau central formé de protons et d'électrons, les trajectoires, suivies par les électrons satellites, étant non seulement stationnaires mais encore sélectionnées : A chaque trajectoire correspond un niveau d'Energie déterminé et il n'y a action de la matière sur l'éther que lorsqu'un électron saute d'un niveau à l'autre.

Il y a lieu d'insister ici sur l'évolution qui s'est produite dans les idées depuis l'époque de Lorentz jusqu'à celle de Bohr, en ce qui concerne le processus de l'émission des ondes : dans la théorie électronique, une émission d'onde accompagnait toute accélération de l'électron ; elle pouvait mettre en jeu une quantité d'Energie quelconque ; dans la théorie quantique, l'émission est essentiellement discontinue et la fréquence de la lumière émise caractérise la grandeur de l'Energie dépensée dans la rupture d'équilibre.

Nous sommes bien loin de la mécanique classique et en contradiction formelle avec elle, non seulement du fait de la sélection de certaines trajectoires parmi toutes les trajectoires concevables, mais surtout du fait de l'immuabilité de ces trajectoires considérées comme stables par hypothèse, alors qu'elles ne devraient pas l'être.

Ainsi donc sont seules présentes, dans le système atomique, les trajectoires répondant à une loi de quantification de l'Energie définie pour chaque élément chimique ; cette loi caractéristique de l'élément considérée nous est révélée par l'étude du spectre de l'élément en question. La loi de similitude de Moseley, qui établit une correspondance entre les spectres de divers éléments et le paramètre de structure que constitue le nombre atomique (nombre d'électrons satellites du modèle d'atome de Rutherford), donne un sens physique concret aux conceptions de Rutherford et de Bohr.

La théorie de Bohr permet, dans le cas simple de l'atome d'hydrogène, de trouver les lois de succession des raies du spectre que représentent les séries de Balmer, de Paschen, de Lyman, etc... ; elle permet aussi, quand on tient compte, comme l'a fait Sommerfeld, de la variation de la masse avec la vitesse, de prévoir la structure fine des raies de l'hydrogène.



Le travail de Sommerfelde constitue le premier exemple d'application couronnée d'un plein succès, d'une mécanique relativiste et quantique à l'étude des mouvements atomiques.

On sait quels développements a reçus la mécanique atomique de Bohr et quelle puissance de représentation elle renferme. La classification des éléments chimiques de Mendeleef a été rénovée par la considération de l'atome de Bohr et des confirmations expérimentales de toutes natures prouvent que la conception des niveaux d'Énergie et des nombres atomiques devra être conservée quelles que soient les transformations de la mécanique atomique.

\*  
\*\*

Mais le modèle d'atome de Bohr était beaucoup trop simple pour permettre de rendre compte de phénomènes aussi complexes que ceux que révèle l'analyse spectrale : aussi en 1925, Heisenberg, se refusant à « deviner le microcosme » et à construire à priori des modèles d'atome, essaie d'établir une discipline nouvelle, conforme d'ailleurs aux traditions de l'optique de Fresnel, en partant d'une « cinématique générale des vibrations ». Une radiation simple étant définie physiquement par une fréquence, une intensité et une phase, il met ces éléments en évidence sous forme de série de Fourier multipériodique. Il établit des règles de composition de ces systèmes vibrants, règles qui, comme le montre Max Born, se confondent avec celles du calcul des matrices d'Hermite.

Ces règles sont telles, rappelons-le, que la multiplication de deux matrices n'est pas une opération commutative et que le produit symbolique  $a b$  est différent de  $b a$ .

Prenant comme point de départ cette cinématique « expérimentale » que l'étude du spectre permet de définir, Heisenberg essaie de trouver une règle de quantification assez générale pour pouvoir servir de base à une mécanique quantique : après divers tâtonnements, il adopte la relation de Kuhn et Thomas :

$$p_k q_k - q_k p_k = \frac{h}{2\pi i}$$

dans laquelle  $h$  représente le quantum d'action de Planck,  $q_k$  une coordonnée généralisée et  $p_k$  le moment correspondant.

La cinématique et la quantification étant ainsi définies, Heisenberg établit sa mécanique en traduisant, en langage matriciel et quantique,

les équations fondamentales de la mécanique classique mises sous la forme que leur a donné Hamilton.

En partant des équations d'Hamilton

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial H}{\partial q} \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}$$

Heisenberg établit un système de relations cohérentes constituant la mécanique matricielle et quantique ; il retrouve, sous une forme beaucoup plus générale que celle déduite du modèle de Bohr, les niveaux d'énergie  $E_1, E_2, \dots E_n$  et la relation entre les fréquences et les niveaux.

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n.$$

Cette conception d'une cinématique purement vibratoire a été généralisée par Dirac qui établit la théorie dite « des nombres  $q$  de Dirac ». Dirac n'admet pas a priori que ces nombres sont des séries multipériodiques représentables par des matrices et il suppose seulement qu'ils satisfont à la règle de quantification :

$$pq - qp = 1$$

quand  $q$  et  $p$  sont bien des coordonnées et des moments correspondants ; par contre :

$$p'q - qp' = 0$$

quand la coordonnée  $q$  et le moment  $p'$  ne se correspondent pas.

Dirac, donnant un sens concret à l'analogie de forme existant entre la relation de Kuhn et Thomas et les crochets de Poisson, arrive, d'une façon peut-être plus directe qu'Heisenberg, aux équations d'une mécanique quantique qui ne diffère de celle de Max Born-Heisenberg que par une plus grande généralité, puisqu'elle n'implique pas la périodicité des coordonnées généralisées. Dirac réalise ainsi l'espoir formulé par Planck dans une communication célèbre faite au Congrès Solvay en 1911 :

« Il n'y a aucun doute que, dans le cas où l'hypothèse des quanta possède un sens profond l'élément d'action  $h$  doit avoir aussi une importance fondamentale pour les phénomènes non périodiques et non stationnaires. »

\*  
\*\*

Partant de la conception ondulatoire de Louis de Broglie, le Professeur Schrodinger, dans une série de mémoires d'une extrême beau-

té, est parvenu à démontrer l'identité des problèmes de mécanique quantique et des problèmes où intervient son équation des « ondes »

$$\Delta\Psi + \frac{8\pi^2}{h^2} (E - V) \Psi = 0.$$

Cette équation différentielle résulte des équations générales de la mécanique mises sous la forme que leur a donnée Jacobi, quand on suppose que le mouvement est vibratoire et que les énergies propres et potentielles sont respectivement  $E$  et  $V$ .

L'équation de Schrodinger n'admet de solutions finies et déterminées que pour une série discrète de valeurs de l'Énergie propre  $E$ , chacune de ces valeurs correspondant à un niveau d'Énergie de la théorie de Bohr ou de celle d'Heisenberg.

Schrodinger a montré, par une série de calculs extrêmement ingénieux, comment, en donnant au moment  $p$  correspondant à la coordonnée  $q$  généralisée le sens « d'opérateur » que lui assigne la mécanique classique <sup>(1)</sup> :

$$p = \frac{\partial}{\partial q}$$

les trois théories d'Heisenberg-Max Born, de Dirac et de Schrodinger sont donc au fond équivalentes, malgré les procédés de quantification très différents employés.

La mécanique ondulatoire de de Broglie-Schrodinger permet d'aborder tous les problèmes de la mécanique atomique d'une manière plus concrète, plus physique si j'ose dire, que les mécaniques de Dirac et d'Heisenberg qui procurent, par contre, de grandes facilités au point de vue de l'écriture, du fait même de leur symbolisme systématique.

Schrodinger a développé sa théorie en vue d'arriver à une représentation ondulatoire de la matière : le corpuscule qui, à l'échelle de la macromécanique, aurait joué le rôle de point matériel, serait en fait, à l'échelle de la micromécanique, un « paquet d'ondes ». Malheureuse-

(1) En appelant  $f$  une fonction absolument quelconque, on peut dire que l'équation symbolique :

$$pq - qp = 1$$

signifie :

$$pqf - qp f = f$$

Elle devient une identité quand on donne à  $p$  le sens de l'opérateur  $\frac{\partial}{\partial q}$  on a alors en effet l'identité :

$$\frac{\partial q f}{\partial q} - q \frac{\partial f}{\partial q} = q \frac{\partial f}{\partial q} + f - q \frac{\partial f}{\partial q} = f.$$

ment, cette conception si séduisante doit être abandonnée, au moins sous sa forme actuelle, en raison des objections graves qu'elle soulève, tant en ce qui concerne l'instabilité foncière d'un paquet d'ondes qu'en ce qui concerne la possibilité de représentation dans l'espace ordinaire des mouvements de plusieurs corpuscules.

Arrivé au point où nous sommes parvenus, il faut reconnaître qu'une mécanique, dont les développements ne peuvent se poursuivre que dans un espace de configuration <sup>(1)</sup>, a perdu en précision ce qu'elle a gagné en généralité, et la question se pose de savoir si on pourra, comme en mécanique classique, passer de la mécanique individuelle à la mécanique des systèmes et inversement, ou s'il faudra renoncer à concevoir les trajectoires individuelles en considérant les équations obtenues comme définissant non des grandeurs physiques définies et mesurables au sens habituel du mot, mais des probabilités d'existence d'un système de grandeurs non discernables ou isolables expérimentalement.

Heisenberg a résumé sa conception nouvelle du monde physique dans son fameux principe d'indétermination que l'on peut énoncer en disant que « l'état d'une particule quelconque ne peut être rigoureusement déterminée à un moment donné, au point de vue mécanique ». Si, à un moment donné, on définit un état au moyen des coordonnées généralisées  $q$  et  $p$  (position et quantité de mouvement par exemple) il sera impossible de mesurer exactement à la fois les valeurs de  $p$  (vitesse) et  $q$  (position) <sup>(2)</sup>, car toute méthode d'observation entraînant la mise en jeu d'au moins un quantum d'action, la perturbation produite dans le mouvement  $\Delta p$  sur  $p$  et  $\Delta q$  sur  $q$  rendra très grande la variation de vitesse  $\Delta p$  si on veut mesurer la position ou la variation de position  $\Delta q$  si on veut mesurer la vitesse, le produit  $\Delta p \Delta q$  devant rester comme le démontre Heisenberg égal au quantum d'action  $h$  ou à un de ses multiples.

$$\Delta p \Delta q = nh.$$

Autrement dit, le principe d'Heisenberg postule qu'il est impossible, dans le domaine atomique, de trouver une seconde relation entre  $\Delta p$  et  $\Delta q$  permettant de déterminer séparément  $\Delta p$  et  $\Delta q$ .

(1) Espace dans lequel le nombre de dimensions est égal au nombre des variables.

(2)  $q$  coordonnée généralisée,  $p$  moment correspondant; les produits  $pq$  et  $\Delta p \Delta q$  ont, comme on sait, les mêmes dimensions que l'action mécanique.

Nous ne discuterons pas cette conception antidéterministe de la micro-mécanique, bien qu'à notre avis elle soit plus que contestable et que, comme le dit Eddington, le mouvement de la lune existe même là où il n'y a pas d'hommes pour l'observer.

Cette indétermination foncière placée à la base même de la physique rationnelle permet de justifier la conception statistique de la mécanique pour les phénomènes atomiques et la mécanique classique, rigidement déterministe, pour les phénomènes observables avec nos sens grossiers.

Le programme de développement de la mécanique comprendrait donc, au point de vue auquel on se place actuellement, trois stades successifs :

D'abord étude des mouvements élémentaires *concevables* par des méthodes relevant de la mécanique classique, puis sélection des mouvements *possibles* parmi les mouvements concevables par des méthodes de quantification et, enfin, définition d'un *état réel observable* par la probabilité d'existence de mouvements élémentaires possibles et non isolables.

Une grandeur physique mesurable ne serait plus une quantité susceptible d'augmentation ou de diminution mais un ensemble touffu de mouvements possibles non discernables les uns des autres ou, ce qui revient au même, un mouvement extrêmement complexe non décomposable en mouvements élémentaires isolables.

Cette conception de la notion de grandeur physique, qui dérive de la théorie cinétique de Maxwell et de Boltzmann, a été présentée l'année dernière, sous une forme particulièrement suggestive, par M. Proca qui, retournant pour ainsi dire la question, essaie de déduire les équations des mécaniques ancienne et nouvelle des principes fondamentaux de l'Energétique : principe de Hirn et principe de Carnot — principe de la conservation de l'Energie et principe de « moindre entropie ».

M. Proca, après avoir montré l'analogie existant entre l'action mécanique et l'entropie thermodynamique, utilise la relation de Boltzmann liant l'entropie à la probabilité d'un état pour trouver la loi de probabilité d'existence d'un mouvement ; il trouve ainsi une équation de même forme que celle introduite par Schrodinger en mécanique

ondulatoire mais un peu plus générale <sup>(1)</sup>. Il arrive ainsi à une conclusion analogue à celle de Dirac qui a voulu, au fond, ne pas limiter la mécanique nouvelle à la considération des seuls mouvements ondulatoires et il n'admet pas à priori qu'un mouvement *quelconque* doit se faire nécessairement par « ondes de phases » au sens de de Broglie-Schrodinger.

\*  
\* \*

La plupart des théories quantiques, sauf celle de Louis de Broglie, ont été établies sans recourir à la représentation relativiste. Au cours du développement des théories, cette adaptation a été faite en provoquant parfois des découvertes nouvelles. Nous avons déjà indiqué à ce sujet comment Sommerfelde avait été amené à prévoir ainsi la structure fine des Raies de l'Hydrogène, en partant de la théorie de Bohr.

La mise sous forme relativiste des équations de Schrodinger a donné lieu à une foule de travaux fort intéressants parmi lesquels il convient de citer tout particulièrement ceux de Kaluza sur la représentation dans un espace à cinq dimensions: Klein, Einstein, de Broglie, Fock, de Donder et bien d'autres ont poursuivi ces recherches, en envisageant tous les modes de représentation possible dans un Univers à quatre ou cinq dimensions, en se plaçant au point de vue de la relativité restreinte et de la relativité généralisée.

Quand ces études auront permis d'arriver à une expression complète et simple de la mécanique quantique dans l'Univers de la relativité restreinte, nous serons parvenus au stade que nous avons défini, au début de cette étude, comme la seconde approximation de la physique rationnelle.

Pour aller plus outre et établir la mécanique quantique sur des bases tout à fait générales conformes aux idées nouvelles d'Einstein (Théorie du champ unitaire) il sera nécessaire à mon avis de partir non des équations de Jacobi ou d'Hamilton qui supposent l'existence de relations holonomes c'est-à-dire exprimables en termes finis entre variables naturelles et coordonnées généralisées, mais de celles d'Ap-

---

(1) On ne peut déduire l'Equation de Schrodinger de l'équation de Jacobi qu'à condition d'admettre que la « fonction d'action »  $S$  satisfait comme l'a montré Isakson, à une relation supplémentaire  $\Delta S=0$ . La forme de cette équation implique que parmi tous les mouvements possibles on se borne à considérer les mouvements périodiques.

pell' qui sont seules valables dans le cas des liaisons différentielles non intégrables (liaisons non holonomes). La considération de l'Energie d'accélération d'Appell me paraît pouvoir seule conduire à des résultats assez généraux pour être peut-être définitifs.

Je me propose de revenir ultérieurement sur cette importante question.

Le moment paraît venu de préciser, dans un exposé aussi rapide que possible, comment la théorie de la relativité a permis de définir géométriquement l'Univers dans lequel la Physique doit désormais évoluer. Il importe, en effet, de montrer comment les théories relativistes et quantiques se complètent sans s'opposer, l'une étant presque exclusivement physique et expérimentale, l'autre plus spécialement géométrique et spéculative.

#### LA GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE DE L'UNIVERS

##### CALCUL TENSORIEL

L'opinion de Descartes que toute la physique n'était autre chose que géométrie semble se confirmer de plus en plus, au moins en physique mathématique, et on peut dire que ce que l'on appelle maintenant théorie mathématique d'un groupe de phénomènes n'est, au fond, que la représentation géométrique des grandeurs physiques qui les déterminent.

La cinématique prend, en effet, un sens purement géométrique dès que l'on cesse d'attribuer au temps un sens concret de variable privilégiée distincte des coordonnées de l'espace. Mais le principe même de toute représentation géométrique étant de faire un modèle géométrique du phénomène physique considéré, il n'y a aucune raison d'exclure le temps de ce mode de figuration. Si la représentation géométrique trouvée est correcte, à toute loi naturelle régissant les phénomènes considérés doit correspondre une relation géométrique entre les grandeurs géométriques qui constituent le modèle analytique des grandeurs physiques ; inversement, à toute relation géométrique, déduite par des calculs réguliers des équations de définition géométrique des grandeurs physiques, doit correspondre une loi naturelle entre ces grandeurs.

Il est clair que ce que nous avons appelé « calculs réguliers » devait s'entendre, avant Einstein, dans le sens de transformations mathéma-

tiques que l'on peut effectuer quand on suppose que les vecteurs; représentant les grandeurs naturelles, sont tracés dans un espace euclidien à 3 dimensions et qu'ils varient en fonction d'un temps absolu.

Les difficultés que soulève l'optique des corps en mouvement, difficultés si bien analysées et mises en évidence par Lorentz, n'ont pu être résolues, comme on sait, qu'en admettant, avec Einstein, que les « calculs effectués conformément aux règles de la cinématique classique ne constituaient pas un système de calculs réguliers » pour le groupe de phénomènes considérés ; autrement dit, en reconnaissant que la géométrie analytique de Descartes ou la cinématique de Galilée n'étaient pas celles de notre Univers phénoménal.

La simple différenciation des équations en termes finis qui constituent le groupe de Lorentz a fourni à Einstein, pour la composition des vitesses, une règle différente de celle admise en cinématique classique, règle qui définit une cinématique nouvelle et qui suffit à expliquer directement et d'un seul coup, non seulement la constante absolue de la vitesse de la lumière dans le vide, mais encore les phénomènes d'aberration de Bradley ou d'entraînement partiel des ondes lumineuses Fizeau-Foucault.

De même que nous avons pu découvrir que la terre était ronde, alors que les Anciens la croyaient plate, Einstein a découvert que notre Univers était lui aussi « courbe », alors que nous le croyions Euclidien : De même que, par des mesures effectuées uniquement à la surface de la terre, nous avons pu déterminer le rayon de celle-ci, par des mesures faites dans notre Univers, et que traduisent les équations de Lorentz, nous avons pu découvrir la courbure de notre Univers.

Cette interprétation géniale, donnée par Einstein, du groupe de Lorentz, a ouvert à la Physique mathématique une voie nouvelle qui devait conduire à l'édification d'une géométrie générale dont le calcul tensoriel n'est que la traduction analytique.

Sans entrer dans le détail des théories, je dirai seulement que toutes les méthodes topographiques de description d'une surface, d'un espace, d'un Univers à un nombre quelconque de dimensions ont pu être ramenées à deux types généraux que l'on désigne sous le nom de connexion linéaire ou affine, et de connexion quadratique ou métrique.

Ce dernier type de connexion comporte des relevés sur le terrain par mesure d'angles et de distance ; c'est celui qui constitue, au fond, la géométrie de Riemann ou étude des surfaces généralisées faite en sup-



posant connu l'élément de ligne d'Univers, c'est-à-dire un ensemble de règles topographiques analogues à celles que nous employons nous-mêmes normalement.

Par des mesures faites à la surface de notre globe supposé, pour simplifier, rigoureusement sphérique, nous pourrions déterminer le Rayon de la Terre. Mesurons d'abord la longueur de la circonférence  $M'MM''$  obtenue en portant le long d'arcs de grands cercles des longueurs  $NM$  égales.

La longueur  $l_1$  de cette circonférence est évidemment égale à  $2 \pi R \sin \theta$   $l_1 = 2 \pi \sin \theta$ , égale à  $R \theta$  alors que la longueur  $l_2$  de l'arc  $NM$  est elle-même  $l_2 = R \theta$ .

Ces deux équations qui permettent de déterminer  $R$  et  $\theta$  montrent

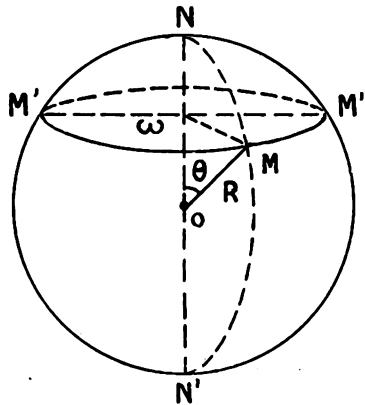


Figure 2.

que la longueur de la circonférence  $2 \pi R \sin \theta$  n'est pas égale à  $2 \pi MN = 2 \pi R \theta$ , relation qui devrait exister si la terre était plate ( $\theta$  étant alors infiniment petit).

Les deux groupes de formes analytiques correspondant à chacun des types de connexions énumérées plus haut sont :

pour la connexion affine

$$(I) \quad dx'_i = \sum_j h^j_i dx^j_i \quad j = 1, 2, 3, 4$$

pour la connexion métrique

$$(II) \quad ds^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx_i dx_k \quad i, k = 1, 2, 3, 4.$$

Ces deux modes de définition d'un Univers ne peuvent être entièrement équivalents quand on les considère dans toute leur généralité

puisque le premier contient 16 fonctions arbitraires alors que le second n'en renferme que 10.

On a pu démontrer que le groupe général II étant équivalent à (I) quand les relations différentielles formant le groupe (I) sont des différentielles exactes ; les relations (I) sont alors dites holonomes. Par contre, la connexion affine est plus générale que la connexion métrique quand les 16 fonctions qui la définissent sont entièrement arbitraires et ne sont pas soumises à des relations d'intégralité ou d'holonomie

Einstein a montré successivement :

a) Que la connexion affine (I) représentait un Univers de structure *électromagnétique vide de matière* quand les 16 coefficients de la connexion affine se réduisaient tous à des constantes (relativité restreinte) ;

b) Que la connexion métrique (II) représentait un Univers de structure purement *gravitationnelle* quand les 10 fonctions  $g_{ik}$  définissant la connexion métrique sont alors absolument arbitraires ; les relations (I) sont holonomes et le champ électro-magnétique est nul ;

c) Que la connexion affine générale représentait un Univers de structure *électromagnétique et gravitationnelle* quand les 16 fonctions  $h_i^j$  définissant la connexion affine sont entièrement arbitraires (théorie du champ unitaire).

En utilisant l'outillage géométrique déjà créé par Christoffel, Riemann, Ricci, Levi-Civita, et bien d'autres, Einstein a pu, en *Relativité généralisée* montrer la correspondance existant entre la métrique d'un Univers et la répartition des masses newtonniennes.

La détermination des « potentiels  $g_{ik}$  » en fonction de la position des masses newtonniennes, n'a pu être faite d'une façon rigoureuse que dans le cas d'une masse unique, par Schwartzchild ; mais Einstein avait pu auparavant, par une méthode d'approximation, non seulement retrouver la loi de gravitation de Newton, mais encore la compléter par l'addition de termes permettant d'expliquer et de calculer le déplacement du périhélie des planètes et notamment celui de Mercure qui est le plus important. On sait comment Einstein a déduit également de sa théorie des résultats nouveaux tels que la courbure des rayons lumineux au voisinage du Soleil et le déplacement correspondant des raies du spectre.

Ce n'est qu'après avoir créé lui-même une nouvelle géométrie en retrouvant des résultats obtenus par E. Cartan, Eddington et Weyl, qu'Einstein est parvenu tout récemment à montrer, dans sa théorie du champ unitaire, qu'il était possible de représenter en même temps, dans un Univers espace-temps à 4 dimensions, toutes les grandeurs physiques que l'on rencontre dans l'étude de la gravitation et de l'Electromagnétisme, et de construire ainsi une géométrie analytique utilisable dans tout le domaine de notre Univers Physique. Cette correspondance théorique une fois établie entre grandeurs physiques mesurables et grandeurs géométriques invariante ou tenseurs, la connaissance de la connexion affine doit conduire à celle de toutes les lois physiques pouvant exister entre grandeurs physiques.

L'étude des grandeurs géométriques invariantes qui constitue le calcul tensoriel sera aussi utile au physicien que la géométrie sphérique au marin, ou la représentation conforme au cartographe ; elle formera un outillage perfectionné permettant de construire en série, pour ainsi dire, toutes les lois physiques pouvant exister dans un Univers défini, comme nous l'avons vu, par une règle topographique affine ou métrique. La mécanique que l'on déduira de cette géométrie analytique pourra alors être désignée sous le nom de mécanique « rationalisée », au sens industriel du terme, sans que cette appellation diminue en rien le caractère rigoureux de la mécanique nouvelle.

La théorie du champ unitaire d'Einstein me semble devoir être rapprochée de la théorie du champ mixte de Vaschy, dans laquelle le champ total était défini en fonction de 2 séries de fonctions potentielles, les potentiels scalaires résultant de la présence de masses newtonniennes et les potentiels vecteurs résultant de l'action des masses laplaciennes.

Signalons qu'Hermann Weyl et Eddington étaient déjà parvenus à combler la lacune existant entre les deux premières théories de la relativité d'Einstein, et à représenter le champ électromagnétique au moyen d'un artifice très ingénieux et très fécond permettant de disposer de paramètres supplémentaires en nombre suffisant. L'artifice consistait à admettre que l'étalon de longueur varie d'un point à un autre dans l'Univers et que l'unité de longueur est une fonction linéaire des coordonnées choisies, de manière à être indépendante de la direction (théorie de Weyl) ou à dépendre de celle-ci (théorie d'Eddington).

L'introduction de cette fonction auxiliaire permet de constituer un

système géométrique complet rendant compte, en même temps, de la gravitation et de l'électromagnétisme. Mais cette addition d'une fonction d'étalonnage ne résoud pas, à notre avis, le problème véritable qui est de trouver une représentation géométrique de *tous* les phénomènes naturels par une discipline *unique*, bien que les équations indiquées par Eddington diffèrent peu de celles trouvées par Einstein dans sa théorie du champ unitaire.

Quelle que soit la marche suivie pour arriver à une représentation analytique complète des phénomènes naturels, la notion classique de continuité géométrique demeure inchangée et on se demande comment il sera possible d'introduire rationnellement la notion de variation discontinue de l'action Hamiltonnienne qui est à l'origine de la théorie des quanta. Pour le moment, faisant abstraction des difficultés philosophiques qu'elles soulèvent, les théories relativistes et quantiques sont pour ainsi dire juxtaposées en attendant qu'elles puissent se fondre et se confondre dans une discipline unique.

\*  
\*\*

Dans cet exposé peut-être un peu trop rapide de l'évolution des conceptions scientifiques modernes je me suis attaché à conserver à peu près le mode de présentation adopté par les auteurs des diverses théories dans leurs mémoires originaux ; mais, au point où nous sommes parvenus, il semble possible de parler un langage plus simple susceptible peut-être de faire comprendre le sens profond des idées nouvelles.

Nous pouvons, en effet, comparer les théories physiques qui essaient de représenter l'Univers phénoménal à un tableau si nous parlons le langage classique, à une tapisserie si nous parlons le langage quantique. Si nous regardons une tapisserie de près et dans le détail, sa structure maillée nous apparaît, si nous la regardons de loin et dans son ensemble elle nous donne la même impression de continuité que le tableau aussi bien en ce qui concerne le dessin que le coloris. Et cependant alors que la position d'un point du tableau peut être considérée comme exactement définie la position de chaque fil de la tapisserie est indéterminée dans la maille.

Le principe d'indétermination d'Heisenberg exprime sous une forme analytique que la détermination d'un état phénoménal ne peut être faite dans la trame « d'action » de notre Univers avec une précision

supérieure à celle d'une maille, c'est-à-dire à celle d'un quantum d'action.

Si l'Univers a une constitution maillée dans le domaine de l'action, ou si, ce qui revient au même, l'action est quantifiée, on doit renoncer à représenter les phénomènes naturels par des équations différentielles complétées par des conditions initiales rigoureusement définies et il faut revenir à une conception plus arithmétique des lois de la nature : comme l'a dit Kronecker « Dieu a fait les nombres entiers, le reste est l'œuvre de l'Homme ».

Si au lieu d'étudier localement les phénomènes du microcosme, c'est-à-dire les phénomènes n'intéressant qu'un petit nombre de mailles de la trame, où l'indétermination et la discontinuité apparaissent flagrantes, nous considérons des phénomènes embrassant un large espace, les irrégularités du contour s'atténuent et l'apparence de la continuité s'affirme.

Mais du fait de la discontinuité élémentaire que l'expérience nous a révélée, nous ne pouvons plus attribuer aux lois habituelles traduisant un déterminisme absolu qu'une signification statistique ; la probabilité moyenne de présence d'un ou plusieurs fils dans une maille.

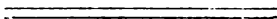
Quelle forme faut-il donner à la trame de l'Univers ? Nous avons admis implicitement que le montage de notre métier était tel que le canevas sur lequel nous travaillions était plan ; mais rien ne nous empêche de concevoir un canevas courbe, cette courbure étant d'ailleurs aussi compliquée que nous voudrions. La géométrie analytique que les théories d'Einstein ont permis de constituer n'est autre chose que l'outillage permettant de travailler, c'est-à-dire de raisonner, sur un canevas de forme quelconque.

La théorie de la relativité généralisée indique que tous les canevas courbes applicables les uns sur les autres correspondent à une même répartition des masses newtonniennes alors que la coïncidence de deux canevas ne peut être obtenue sans déformation que si la répartition complète des masses Newtonienne et Laplacienne est la même pour les deux canevas.

Inutile de dire que cette comparaison grossière est beaucoup trop simpliste pour pouvoir être retenue telle qu'elle au point de vue scientifique, je l'ai quand même indiquée parce qu'elle me paraît commode et suggestive ; elle permet je crois de comprendre la signification gé-

nérale de la théorie des quanta et de celle des théories de la Relativité et de situer, pour ainsi dire ces théories l'une par rapport à l'autre.

Tout porte à croire que malgré leurs aspects touffus et quelquefois contradictoires, les théories relativistes et quantiques vont s'harmoniser et se clarifier assez pour permettre de constituer une physique rationnelle plus générale, plus harmonieuse et sans doute plus simple que notre géométrie et notre mécanique classiques.



# QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'EMPLOI DES MATHÉMATIQUES en ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE et SCIENTIFIQUE <sup>(1)</sup>

par M. Hippolyte PARODI

---

## SOMMAIRE

*Tendances de la physique moderne au point de vue mathématique. — Les théories de la relativité restreinte et généralisée, la théorie du champ unitaire d'Einstein en tant que géométrie analytique de l'Univers phénoménal.*

C'est pour répondre au désir exprimé par un certain nombre de nos Collègues que j'aborde ce soir un sujet qui ne rentre pas dans le cadre habituel de nos préoccupations, bien qu'il intéresse tous les Ingénieurs un peu avertis qui savent combien les progrès réalisés dans la Science pure réagissent vite dans le domaine industriel.

Je comprends quels avantages il peut y avoir à demander à un Ingénieur de venir exposer à des Ingénieurs les représentations mathématiques nouvelles des lois de la Physique, non seulement pour obtenir une présentation moins abstraite dans la forme, mais encore plus concrète quant aux résultats ; mais je sais aussi maintenant, par expérience, combien il est difficile de procéder à ce travail de simplification sans risquer de déformer des théories qui sont encore, d'ailleurs, en pleine évolution.

Mon travail paraîtra certainement trop abrégé et très incomplet à ceux qui sont dès maintenant, initiés à ces théories nouvelles, et sans doute obscur à ceux qui ne le sont pas : je vous le présente cependant tel qu'il est, m'excusant par avance des défauts et des lacunes d'une étude particulièrement délicate quand on veut se libérer, comme j'ai essayé de le faire ici, de tout appareil mathématique pour ne considérer que les principes...

Je ne me propose pas ce soir de vous exposer les théories physiques nouvelles et je veux seulement vous présenter quelques observations

---

(1) Communication présentée en séance commune de la Société Française des Electriciens et de la Société des Ingénieurs Civils de France le 24 janvier 1930.

sur les études magistrales actuellement en cours d'achèvement, afin d'en faire mieux comprendre les tendances et la portée. J'essaierai surtout de vous indiquer les caractéristiques générales de l'outillage mathématique extrêmement puissant dont la Physique va être et est déjà partiellement dotée.

En quoi consiste cet outillage ? Il comprend deux éléments essentiels :

1° Une géométrie analytique relativiste valable dans tout le domaine connu des phénomènes naturels.

Cette géométrie, construite pour une multiplicité à quatre dimensions que nous appellerons Univers, est généralisée sous forme « d'espace de configuration », et étendue à un nombre quelconque de dimensions ; ce terme d'espace de configuration étant pris dans le sens que lui avait déjà donné Hertz en mécanique classique.

Cet ensemble d'études de géométrie analytique pure qui comprend le calcul différentiel absolu de Levi Civita constitue ce que l'on appelle « le calcul tensoriel ».

2° Une mécanique relativiste et quantique obtenue en transposant la mécanique classique de l'Univers espace-temps ordinaire dans l'Univers relativiste et en effectuant, parmi tous les mouvements possibles définis par cette mécanique, une sélection réalisée par application du principe de quantification de l'action Hamiltonienne.

Je m'occuperai presque uniquement de la géométrie analytique relativiste ou calcul tensoriel, afin de vous montrer surtout combien l'étude de cette nouvelle branche des mathématiques deviendra, pour l'Ingénieur électricien, aussi utile que celle de la trigonométrie sphérique pour le marin ou de la représentation conforme pour le cartographe.

Nous allons être conduits à parler constamment de multiplicités, d'espaces, d'Univers de structures diverses ; il n'y a là rien de plus étrange, au point de vue auquel nous nous plaçons, que de parler de surfaces de formes diverses, et nous réserverons le nom d'Univers réel ou phénoménal à celui où se passent réellement les phénomènes naturels.

#### TENDANCES MODERNES DE LA PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

On peut dire que toutes les théories classiques ont été établies en transformant en axiome une hypothèse physique concrète faite plus



ou moins intuitivement et en en tirant, par des *déductions mathématiques*, des conséquences pouvant être soumises au contrôle de l'expérience.

C'est ainsi que se sont formées pour ainsi dire parallèlement la géométrie, la géométrie analytique, la mécanique et les théories physiques fragmentaires qui nous ont été enseignées dans notre enfance.

Maintenant qu'à la suite de très nombreuses tentatives ayant d'ailleurs comporté bien plus d'insuccès que de succès, la science est parvenue à constituer des corps de doctrines de plus en plus importants rendant compte chacun d'un très grand nombre de phénomènes, elle tend à s'affranchir des hypothèses intuitives trop simples et peut-être trop concrètes parce que trop particulières, pour ne conserver qu'un nombre minimum de principes renfermant ce qu'il y a d'essentiel dans les diverses hypothèses élémentaires.

La découverte de ces principes généraux est l'œuvre maîtresse du vingtième siècle et il ne faut pas s'étonner si, par essence même, les méthodes nouvelles de la physique mathématique sont plus abstraites et moins facilement « assimilables » que les anciennes.

La double évolution relativiste et quantique, qui s'est produite depuis le début du vingtième siècle, tend vers deux buts essentiellement différents : d'un côté, généralisation poussée à l'extrême pour trouver toutes les représentations géométriques possibles et, de l'autre, particularisation des états possibles de mouvement pour atteindre le réel et l'expérimental.

Pour éviter des confusions et des erreurs graves, il convient, dès le début, d'établir une ligne de démarcation aussi nette que possible entre les recherches géométriques ou analytiques purement logiques et spéculatives, ayant pour objet de constituer un outillage mathématique utilisable dans tous les Univers de structures concevables, et les recherches de mécanique physique, expérimentales ou empiriques, ayant pour objet de définir avec précision la structure de notre Univers phénoménal : Notre Univers réel devient ainsi un Univers particulier dans la multiplicité des Univers concevables.

Ce qui rend ces études difficilement intelligibles pour ceux qui ne peuvent se donner la peine de les approfondir, c'est d'abord qu'il faut faire un véritable effort pour continuer à employer un langage géométrique en parlant d'espaces à plus de 3 dimensions et c'est

ensuite que la confusion, entre ce qu'il y a de géométrie et de physique dans ces théories, est entretenue dans la plupart des publications où elles sont exposées : Il faut du reste ajouter que si cette distinction, que je considère comme capitale, n'a pas été faite, c'est qu'elle n'a pu l'être dès l'origine, le point de départ de toutes les recherches sur la relativité ayant été précisément la constatation pour ainsi dire expérimentale, faite par Lorentz, que notre Univers électromagnétique était plus général que « l'Univers géométrique » dans lequel on voulait le représenter.

Nous allons préciser ce point en rappelant les origines mathématiques de la théorie Einsteinienne de la Relativité restreinte, première application d'une géométrie analytique ou d'une cinématique généralisée à l'étude des phénomènes physiques.

#### LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Sans entrer dans le détail d'une étude comparative des degrés d'exactitude des lois de la mécanique et de l'électromagnétisme, on peut dire que ces dernières sont valables dans un domaine beaucoup plus vaste que les premières et qu'elles ont pu être vérifiées avec une beaucoup plus grande approximation. Aussi lorsqu'au début du  $xx^e$  siècle de grands esprits, comme Henri Poincaré, eurent démontré l'incompatibilité mathématique de ces lois et expliqué ainsi la raison profonde des échecs éprouvés dans toutes les tentatives d'explication mécanique de l'électricité, il apparut nécessaire de procéder à une refonte complète de notre mécanique dite rationnelle. Il n'est pas étonnant qu'une théorie aussi nettement *émissioniste* que la mécanique classique ne puisse se concilier avec une théorie aussi essentiellement *ondulatoire* que l'électromagnétisme, mais ce qui est un peu surprenant, c'est que l'on ait pu parvenir à faire disparaître cette antinomie, en apparence irréductible, par des considérations aussi simples que celles qu'Albert Einstein a développées dans sa théorie de la relativité restreinte.

Les expressions mathématiques des lois de la mécanique sont les mêmes dans deux systèmes de référence animés, l'un par rapport à l'autre, d'un mouvement de translation uniforme. Autrement dit, quelle que soit la valeur du paramètre  $v_1$  supposé constant, les équations sont invariantes pour la substitution de Galilée, substitution de  $x$  en  $x' + v_1 t'$ , de  $t$  en  $t'$

(1)

Lorentz a montré que les équations de l'électromagnétisme, qu'elles soient écrites sous la forme que leur a donnée Maxwell, ou sous celles proposées par Hertz, Heaviside et Lorentz lui-même, demeurent invariantes pour la substitution

$$\text{de } x \text{ en } \frac{x' + v_1 t'}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}}, \quad \text{de } t \text{ en } \frac{t' + v_1 x'/c^2}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}}. \quad (2)$$

Le premier groupe de substitution traduit le principe de relativité classique ou galiléen, le second traduit le principe de relativité restreinte ou einsteinien, puisqu'en supposant  $v_1$  constant en différentiant ces relations et en formant le rapport.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d(x' + v_1 t')}{d\left(t' + \frac{v_1 x'}{c^2}\right)} \quad (3)$$

on trouve une règle nouvelle loi de composition des vitesses : Cette loi

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (4)$$

se confond avec la loi ordinaire de la cinématique galiléenne quand on suppose que le paramètre  $c$ , vitesse de la lumière *dans le vide*, est infini.

Cette conception cinématique du groupe de Lorentz rend compte d'une façon complète des phénomènes d'aberration de Bradley, de l'entraînement partiel des ondes lumineuses de Fizeau, de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, qu'elle soit mesurée par des observateurs fixes ou en mouvement.

Il y a lieu d'insister ici sur ce fait que la théorie de la relativité restreinte n'a pas une origine expérimentale directe, mais qu'elle résulte de la forme même des lois de l'électromagnétisme qui représentent une multitude de phénomènes de natures très diverses. Si donc des expériences nouvelles venaient jamais infirmer celles de Michelson et Morley sur l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, il faudrait peut-être modifier les théories physiques de l'électromagnétisme, mais il n'y aurait peut-être rien à changer à la théorie de la relativité restreinte, pas plus qu'il n'y a eu à modifier la géométrie sphérique quand on s'est rendu compte que la terre avait la forme d'un ellipsoïde.

La cinématique d'Einstein s'est transformée en géométrie analytique quand, par un artifice constamment employé en mathématique, Einstein a admis la relativité du temps et l'a traité comme une qua-



généralité, atteint par la théorie géométrique, est suffisant ; pour effectuer cette vérification, il faut établir une correspondance non arbitraire aussi complète que possible entre les grandeurs physiques *mésurables* et les grandeurs géométriques invariantes (tenseurs) que la théorie mathématique permet de définir dans leur infinie variété.

C'est ainsi que la « Structure géométrique » de l'Univers Einsteinien a été définie successivement par des relations affines à coefficients constants (Relativité restreinte), puis par une relation métrique à coefficients quelconques (Relativité généralisée) et, enfin, par des relations linéaires à coefficients quelconques (Théorie du champ unitaire), chacune de ces étapes correspondant à une généralisation nouvelle de la géométrie analytique de l'Univers. Tout porte à croire que le degré de généralité actuellement atteint est suffisant pour permettre une représentation géométrique cohérente et complète de tous les phénomènes physiques aussi bien ceux de la gravitation que de l'électromagnétisme, mais il faut bien insister sur ce fait que cette possibilité de représentation n'implique pas la connaissance des phénomènes physiques à représenter.

Ceci revient à dire, pour prendre un exemple concret, que l'étude de la géométrie sphérique, entreprise dès que la forme générale de la terre a été connue, ne peut rien nous apprendre sur la nature des phénomènes qui se passent à la surface du globe. La connaissance de la géométrie sphérique est nécessaire pour représenter commodément les lois des mouvements et définir la configuration des terres et des mers, mais elle est complètement indépendante de celles-ci.

La relativité généralisée est en germe dans la relativité restreinte, car, si on élimine le paramètre arbitraire entre les relations affines définissant la cinématique électromagnétique, on trouve que l'expression métrique :

$$dx' = \frac{dx + v dt}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} \quad dt' = \frac{dt + \frac{v dx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$ds^2 - v^2 dt^2 = d\sigma^2 = c^2 d\tau^2$$

que l'on appelle distance généralisée ou élément de ligne d'Univers, est invariante. Cette expression invariante définit aussi le temps local  $\tau$  de Lorentz.

L'avantage que présente cette transformation et la considération de l'élément de ligne d'Univers est de permettre l'utilisation de résultats géométrique connus : Les études entreprises par Gauss, par Lamé, Riemann, Christoffel et, plus récemment, par Ricci et Levi-Civita, ont en effet permis d'établir une théorie assez complète des surfaces de Riemann, surfaces définies par leur « métrique », c'est-à-dire par l'expression de la distance mesurée sur la surface même par rapport à des axes quelconques tracés sur cette surface :

$$ds^2 = \sum_{ik} g_{ik} dx_i dx_k \quad i, k = 1, 2, 3, 4. \quad (6)$$

Cette théorie se trouve maintenant rassemblée dans tous les ouvrages traitant du « calcul tensoriel » et du calcul différentiel absolu.

On peut montrer que la connaissance de l'élément de ligne d'Univers suffit pour déterminer cette surface quand on admet que les systèmes de référence considérés sont constitués par de véritables réseaux de lignes de coordonnées, c'est-à-dire quand on peut passer des relations différentielles affines à des relations en termes finis comme l'a fait, en sens inverse, Einstein pour passer du groupe de Lorentz à la cinématique de la relativité restreinte. Ceci revient à dire que la définition *métrique* d'un Univers est équivalente à la définition *affine* quand les relations différentielles linéaires

$$x'_j = \sum_i h^j_i dx_i \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

sont intégrables, c'est-à-dire quand chacune de ces expressions représente une différentielle exacte.

Seize fonctions figurent dans l'expression de la connexion affine la plus générale, dix seulement dans l'expression de la connexion métrique et il est possible de démontrer, par des considérations beaucoup plus complexes que celles résumées ici, que les conditions d'*holonomie* ou conditions d'intégrabilité des relations de la connexion affine fournissent les équations complémentaires nécessaires pour passer des 16 fonctions  $h^j_i$  aux 10 fonctions  $g_{ik}$  et inversement.

Cette vérité mathématique étant admise, comme il était nécessaire de découvrir d'abord à quel ordre de phénomène correspondait une connexion *métrique*, puis de déceler les différences qui pouvaient exister, au point de vue géométrique et au point de vue physique, entre deux Univers ayant même connexion métrique mais des connexions affines différentes.

Ce travail énorme de découverte a été effectué par Einstein par stades successifs : Einstein a d'abord montré que deux Univers, ayant même *connexion métrique*, avaient même champ de gravitation, puis que deux Univers ayant même *connexion affine* avaient même « champ unitaire » ou phénoménal, c'est-à-dire même champ de gravitation et même champ électromagnétique.

Il y a lieu de rapprocher, au point de vue des conceptions générales, le champ unitaire d'Einstein du champ mixte de Vaschy. On sait que Vaschy a démontré il y a longtemps, en partant des lois d'attraction à distance, que l'intensité du champ total en un point quelconque était due à une répartition de *masses Newtoniennes* ou scalaires et de *masses Laplaciennes* ou vectorielles agissant simultanément sur ce point. Les premières masses donnent naissance à un champ défini par un *potentiel*, les autres à un champ défini par un *potentiel vecteur*.

La théorie du champ unitaire d'Einstein ne semble pas vouloir dire autre chose, sous cette réserve que la distinction entre champ Newtonien et Laplacien n'est peut-être justifiée que pour des valeurs très petites de chacun d'eux, la fusion entre ces champs étant peut-être plus intime et plus complexe dans le cas général.

#### LES THÉORIES DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE AU POINT DE VUE PHYSIQUE

L'idée qu'Einstein a eue d'appliquer la théorie des surfaces de Riemann à la Physique l'a conduit à une théorie nouvelle de la Gravitation qui, comme l'on sait, a révolutionné l'astronomie, en lui ouvrant des perspectives nouvelles extraordinairement fécondes.

Par une intuition générale, Einstein a admis que les potentiels gik figurant dans l'expression de la *métrique* de l'Univers dépendaient de la répartition des masses Newtoniennes dans cet Univers. En procédant par approximation et en admettant qu'un Univers vide de matière avait une métrique définie par l'élément de distance de la relativité restreinte :

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 \quad (8)$$

avec

$$x_4 = cti \quad i = \sqrt{-1}.$$

Einstein a pu déterminer la valeur du premier terme correctif à appliquer aux divers potentiels gik pour tenir compte de l'introduction d'une masse unique dans le champ.

Par des considérations de symétrie, Schwarzschild est parvenu à trouver l'expression exacte de la métrique d'un Univers dans lequel existe une masse unique ; l'élément de ligne d'Univers a alors comme valeur en coordonnées polaires, la masse unique étant prise comme centre des coordonnées :

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\varphi^2 + \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2. \quad (9)$$

On sait qu'Einstein, en considérant un satellite de masse assez petite pour ne pas troubler la structure générale de l'Univers, a montré que ce satellite décrivait une géodésique de l'Univers défini par la relation métrique (9). La loi de gravitation trouvée ne diffère de celle de Newton que par l'addition de termes très petits mais suffisants pour expliquer le déplacement du périhélie des planètes et notamment celui de Mercure, qui est le plus important. On sait aussi que l'hypothèse d'Einstein a permis de prévoir la courbure des rayons lumineux au voisinage du soleil et un déplacement des raies spectrales.

Les confirmations éclatantes de l'exactitude de la théorie de la gravitation d'Einstein sont aussi importantes, au point de vue mathématique auquel nous nous plaçons ici, que les insuccès répétés qu'ont éprouvés les savants qui ont essayé de représenter les phénomènes électromagnétiques dans un Univers supposé complètement défini par sa métrique. Cet insuccès prouve, si on veut bien se rappeler ce qui a été dit précédemment, que l'hypothèse implicite, faite sur l'intégralité des équations différentielles de liaison (définissant la connexion affine), fait disparaître, dans les formules du calcul tensoriel, les termes qui sont susceptibles de représenter le champ électromagnétique. Einstein, dans sa théorie du champ unitaire, a pu donner à ces termes, en même temps qu'une signification géométrique, un sens physique au moins en première approximation.

#### GÉOMÉTRIES DE WEYL ET D'EDDINGTON

On ne saurait passer sous silence les recherches de Weyl et d'Eddington qui ont eu pour objet la représentation du champ électromagnétique dans un Univers Riemanien, c'est-à-dire défini par sa métrique. Weyl a eu le très grand mérite de donner à la géométrie affine la place qui lui est due et d'essayer de déterminer directement les propriétés linéaires d'un Univers de structure définie par des relations différentielles ou affines ; mais il n'a pu parvenir à représenter ce



champ électromagnétique que par un artifice lui permettant d'introduire, dans les équations, les paramètres qui lui manquaient.

Hermann Weyl a supposé qu'en chaque point de l'Univers l'unité de longueur suivait une loi définie par une fonction linéaire d'étalement.

Eddington est allé beaucoup plus loin dans cette voie en supposant que cette fonction dépend non seulement de la position du point, mais encore de la direction ; en introduisant ainsi la direction dans les calculs, Eddington considère, par un moyen détourné, les masses Laplaciennes du théorème de Vaschy en plus des masses Newtonniennes et il n'est pas étonnant qu'il trouve ainsi, par un processus assez différent, des résultats se rapprochant beaucoup de ceux qu'Einstein déduit de la considération de l'intégralité des relations de la connexion affine.

#### LA THÉORIE DU CHAMP UNITAIRE D'EINSTEIN AU POINT DE VUE GÉOMÉTRIQUE ET PHYSIQUE

Nous avons déjà dit qu'Einstein, retrouvant en cours de route des propositions déjà établies par M. le Professeur Cartan dans ses cours de la Sorbonne, a montré qu'il était possible de concevoir une géométrie plus générale que celle de Riemann par la considération de systèmes de coordonnées non exprimables en termes finis, analogues à celles que l'on rencontre dans la théorie du cerceau. On peut ainsi montrer que l'existence d'une métrique, définie d'une façon générale et par suite arbitraire, est compatible avec celle de lignes congruentes ou parallèles à distance quelconque. Dans un pareil Univers, il peut exister des couples de droites égales et parallèles ne formant pas un parallélogramme fermé.

Nous n'insisterons pas sur les propriétés analytiques de ces Univers, propriétés qui sont encore assez peu connues, les 3 mémoires d'Einstein, qui renferment les éléments de ces géométries nouvelles, datant à peine de quelques mois.

Au point de vue physique, il est possible que la représentation du champ électromagnétique, dans un Univers à connexion affine non holonome, permette de découvrir des formes nouvelles, mais, pour le moment, il nous suffit de dire qu'elle peut être complète et conforme aux équations classiques connues.

Il y a lieu de voir là un triomphe nouveau de la théorie einsteinienne de la relativité qui forme ainsi un ensemble complet et co-

hérent permettant de constituer une géométrie analytique valable dans tout le domaine de l'Univers phénoménal.

Maintenant que nous disposons de la géométrie analytique très générale que constitue le calcul tensoriel, il s'agit de savoir comment nous allons l'utiliser pour la transformer en mécanique. Pour cela, il faut introduire dans la théorie les hypothèses physiques nécessaires pour définir, parmi toutes les mécaniques possibles, la mécanique adéquate à notre Univers réel. Il est clair que toute la difficulté consiste dans la détermination des 16 fonctions figurant dans les expressions de la connexion affine, car, une fois cette détermination faite, les développements mécaniques se réduiront à l'étude des propriétés géométriques d'un Univers entièrement défini.

Mais ici se présentent des difficultés de divers ordres : d'abord des difficultés purement mathématiques, le système d'équations différentielles auquel on aboutit étant extrêmement compliqué et pratiquement insoluble dans l'état actuel de nos connaissances mathématiques, puis une difficulté de principe sur laquelle je désire insister un peu. Remarquons d'abord que, si la géométrie Einsteinienne est complète au point de vue physique, il sera possible de définir les 16 fonctions de la connexion affine par des relations aussi compliquées et aussi nombreuses que l'on voudra : On aura ainsi déterminé la structure d'un Univers à quatre dimensions correspondant à un système de masses Newtonniennes ou Laplaciennes données. Mais ne sera-t-il pas possible et peut-être plus simple de traiter le même problème dans un Univers de configuration ?

Il y a lieu de rappeler que les équations générales de la mécanique, indépendantes des systèmes de référence choisis, s'écrivent, quand on suppose que les équations de liaison sont holonomes, dans un « espace de configuration » c'est-à-dire ayant un nombre de dimensions égal au nombre de coordonnées généralisées considérées et des moments correspondants : Hertz a même montré que les équations d'un système quelconque de points pouvaient s'exprimer comme celle d'un point unique dans un espace de configuration dont l'élément de ligne d'Univers serait représenté par la même expression que la force vive  $T$  du système considéré : Il y a là une correspondance profonde dont il y a lieu de tirer parti. Aussi, tout le calcul tensoriel a-t-il été établi en évitant de préciser le nombre de dimensions de la multiplicité considérée, de telle sorte qu'actuellement on dispose d'un outillage mathé-

matique, peut-être pas très maniable, mais théoriquement utilisable, soit que l'on considère la théorie d'Einstein comme une simple géométrie analytique à quatre dimensions, soit comme une mécanique utilisable dans le sens que lui a donné Hertz.

Remarquons aussi en passant que, quand les liaisons sont holonomes, on peut écrire les équations générales de la mécanique sous des formes diverses comme celles imaginées par Hamilton, Jacobi, Poisson : à chacune de ces formes correspond une des mécaniques relativistes et quantiques valables dans le domaine atomique, établies respectivement par Heisenberg-Max Born, par Schrodinger, par Dirac.

Mais il semble que, pour aller jusqu'au bout de l'idée Einsteinienne relative à la correspondance existant entre les phénomènes électromagnétiques et la non intégrabilité des relations différentielles de la connexion affine, il faudrait établir la mécanique générale nouvelle en partant, non des équations d'Hamilton, de Jacobi ou de Poisson, mais de celles d'Appell applicables au cas des liaisons non holonomes.

Ces équations s'écrivent, comme on sait, en désignant par  $S$  « l'Energie d'accélération d'Appell »

$$S = \frac{1}{2} \sum m J^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial \ddot{q}_1} = Q_1 \quad \frac{\partial S}{\partial \ddot{q}_2} = Q_2 \quad \frac{\partial S}{\partial \ddot{q}_3} = Q_3 \dots$$

Dans ces relations  $J$  représente l'accélération de chaque point exprimée en fonction des coordonnées généralisées  $q$  et des forces généralisées correspondantes  $Q$ .

Nous comptons revenir ultérieurement sur les caractéristiques de cette mécanique encore plus générale que les précédentes.

\*  
\*\*

Nous n'insisterons pas sur ces considérations générales qui nous entraîneraient beaucoup trop loin, notre objectif étant seulement d'exposer des principes généraux et des résultats pratiques.

Le moment est en effet venu de voir ce que les théories géométriques nouvelles ont déjà donné au physicien comme outillage mécanique directement utilisable, étant entendu évidemment qu'au point de vue pratique on applique presque exclusivement, en optique physique, les principes de la relativité restreinte.

Les résultats obtenus déjà, fort importants, sont maintenant d'utilisation courante et, sans entrer dans le détail, je rappellerai seulement que la mécanique de la Relativité restreinte prouve l'identité de l'Energie totale  $E$  d'un corps de masse  $m$  et du produit  $mc^2$ , expression dans laquelle  $c$  représente la vitesse de la lumière. La masse d'un corps en mouvement croissant d'ailleurs avec la vitesse de ce corps conformément à la loi :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

On a donc :  $E = mc^2$  et  $E_0 = m_0 c^2$ ,

d'où :

$$E - E_0 = m_0 c^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right].$$

Cette relation se réduit à la loi classique, d'accroissement d'énergie d'un corps passant de la vitesse 0 à la vitesse  $v$  :

$$E - E_0 = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

valable quand la vitesse  $v$  est petite devant  $c$ , ce qui est le cas de tous les phénomènes mécaniques directement observables.

J'ajouterai que la mécanique de la relativité restreinte permet de réduire les équations du mouvement d'un point à une relation tensorielle unique équivalente à quatre relations entre composantes du tenseur Energie-quantité de mouvement.

Les mécaniques quantiques en cours de mise au point et dont nous ne faisons que rappeler les noms : théorie ondulatoire de de Broglie-Schrodinger, théorie des matrices de Heisenberg-Max Born, théorie des nombres  $q$  de Dirac sont, au fond, entièrement équivalentes, la quantification de l'action conduisant en fait, malgré la diversité des voies suivies, au même résultat final que l'on parte de la forme de Jacobi ou de celle d'Hamilton ou de celle de Poisson.

Schrodinger a démontré la nécessité de cette coïncidence en donnant le sens « d'opérateurs différentiels » aux symboles plus mystiques que mystérieux d'Heisenberg. Cette démonstration était surtout nécessaire pour vérifier que les modes de sélection par quantification de l'action étaient eux aussi équivalents.

Nous n'insisterons pas ici sur les méthodes nouvelles de la mécanique quantique <sup>(1)</sup>, car cette mécanique ne semble pas avoir encore pris sa forme définitive, bien que, je le répète, les résultats numériques obtenus par des moyens extrêmement différents, au moins en apparence, soient les mêmes. Pour le moment, la règle de quantification de l'action conserve son caractère purement empirique et on ne voit pas encore nettement, malgré les tentatives extrêmement profondes de Schrodinger, comment il sera possible d'introduire rationnellement la constante de Planck dans la mécanique.

\*  
\*\*

Cet exposé, dans lequel j'ai essayé de passer en revue dans un langage aussi peu hermétique que possible les aspects divers du calcul tensoriel. s'il ne peut vous donner une idée concrète de sa forme et de ses méthodes, peut, et c'est là ce que je désirais surtout, vous donner un aperçu des buts poursuivis et des résultats obtenus. Malgré leur petit nombre, ces résultats sont extrêmement beaux et importants, puisque Einstein est parvenu non seulement à rétablir l'accord entre la mécanique et l'électromagnétisme, mais encore et surtout, à faire rentrer les phénomènes de gravitation dans le cadre de la Physique générale.

Malgré les immenses difficultés mathématiques que rencontrent les problèmes de la Relativité, je pense qu'il sera possible de les aplanir peu à peu en utilisant peut-être des méthodes analogues à celles qui sont plus familières aux Ingénieurs que celles du calcul tensoriel actuel. La considération de flux mixtes gravifiques, électriques et magnétiques conduira peut-être, comme celle des flux magnétiques et électriques seuls, à des méthodes simplifiées de calcul permettant d'obtenir une première approximation des résultats.

Je me propose de revenir ultérieurement sur ce point en souhaitant que, d'ici là, des calculs complets effectués dans des cas simples par les méthodes du calcul tensoriel permettent d'éclaircir, pour les débutants, le sens concret de principes présentés encore sous une forme extraordinairement touffue et où, comme l'indique M. le Professeur Cartan, une débauche d'indices dissimule souvent une vérité géométrique très simple.

---

(1) Renvoyant notre conférence sur « le développement de l'électricité et l'évolution des conceptions scientifiques ».

# OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE TRANSPORTABLE, A DÉVELOPPEMENT SYNCHRONISÉ <sup>(1)</sup>

par MM. DEMONTVIGNIER et TOULY

*Les oscillographes cathodiques, perfectionnement du tube de Braun, ont vu leurs emplois se multiplier dans ces dernières années, soit sous la forme du tube oscillographique à basse tension Western, soit sous celle de l'oscillographe Dufour, qui a permis l'étude des plus hautes fréquences accessibles.*

*Nous nous sommes proposé, il y a quelques années, de constituer, à l'aide du tube Western, un oscillographe transportable, permettant l'étude des phénomènes périodiques de fréquences aussi élevées que possible, en faisant apparaître leurs courbes représentatives sous leur forme véritable et immobilisées sur l'écran. L'appareil était d'abord destiné à nos recherches personnelles, et son emploi se limitait à des fréquences assez basses; il a été ensuite construit industriellement, et nous avons pu étendre son champ d'action jusqu'à des fréquences d'environ 250 000 périodes par seconde.*

*Nous nous proposons, dans la présente communication, de décrire cet appareil et d'indiquer quelques-unes des applications variées qu'il permet; nous rappellerons d'abord les caractéristiques du tube oscillographique Western; nous décrirons ensuite notre système de développement synchronisé et nous terminerons par la description pratique de l'appareil et des applications de celui-ci.*

## LE TUBE OSCILLOGRAPHIQUE WESTERN

Le tube oscillographique Western ayant déjà été décrit dans de nombreuses publications, nous nous bornerons à rappeler brièvement ses caractéristiques essentielles.

L'appareil se compose (fig. 1) d'une ampoule de verre 1 en forme de poire à fond plat, munie d'un culot spécial à 5 broches. A l'intérieur de cette ampoule se trouve un autre récipient 2, beaucoup plus petit, renfermant un filament à oxyde 3, d'un écran circulaire 4 percé d'un trou, réuni électriquement à l'une des extrémités du filament.

Le récipient 2 débouche dans l'ampoule par un tube de platine 5 servant d'anode, ou de « canon à électrons ». L'axe du canon à électrons passe entre deux paires de plaques déviatrices,  $P_x$  et  $P_y$ , situées dans des plans perpendiculaires. Une plaque de l'une des paires est connectée à une plaque de l'autre paire, et leur ensemble est connecté à l'anode. Le fond plat de l'ampoule est recouvert d'un enduit fluorescent 6. L'ampoule renferme de plus une atmosphère d'argon, sous une pression de quelques baryes.

Le fonctionnement de l'ensemble est le suivant : le filament 3 étant chauffé par un courant convenable émet des électrons qui s'échappent

(1) Communication présentée à la Société en séance publique le 9 novembre 1929.

par le trou de l'écran 4 ; une différence de potentiels convenable étant établie entre l'anode 5 et l'écran 4, les électrons sont accélérés, et forment un pinceau cathodique, traversant successivement le canon à électrons et l'espace compris entre les deux paires de plaques déviatrices  $P_x$  et  $P_y$ .

Le rôle de l'atmosphère d'argon du tube est de prévenir la dispersion du pinceau cathodique, et de rassembler celui-ci de manière à

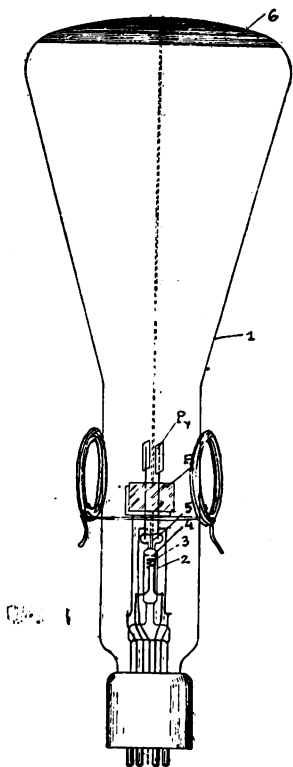


FIG. 1. — Tube oscillographique « Western »

donner sur l'écran un spot de dimensions aussi réduites que possible ; la présence de gaz dans l'ampoule pourrait donner naissance à des ions positifs capables de détériorer rapidement le filament par leur bombardement ; c'est le rôle de l'écran 4 de neutraliser en grande partie cette action, en même temps que le faible volume du récipient 2 empêche l'amorçage d'un arc entre écran et anode.

La finesse du spot obtenu dépend du courant de chauffage utilisé ; la valeur de celui-ci, qui était de 1,1 à 1,4 A pour les premiers tubes



Western, a pu être abaissée dans les plus récents à des valeurs comprises entre 0,8 et 1,1 A. La valeur optimum du courant de chauffage croît avec l'âge du tube, et avec la tension anodique utilisée. La valeur de cette dernière peut varier entre 250 et 400 V, la luminosité du spot croissant d'ailleurs avec elle, mais l'accroissement de la luminosité étant obtenu au détriment de la longévité du tube. La tension anodique nécessaire à la bonne luminosité du spot croît d'ailleurs également avec l'âge du tube ; le débit sur le circuit anodique est de l'ordre de 1 milliampère.

La déviation du pinceau cathodique peut être obtenue par deux procédés : 1° Par application d'une différence de potentiel entre l'une des paires de plaques  $P_x$  ou  $P_y$ . Les déviations ainsi obtenues sont

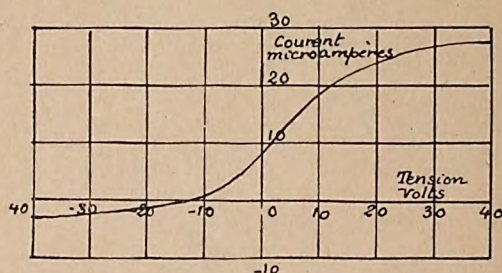


Fig. 2. — Courant de fuite entre plaques, en fonction de la tension appliquée.

sensiblement proportionnelles à la différence de potentiel appliquée. la sensibilité étant inversement proportionnelle à la tension anodique, et l'élongation du spot étant d'environ 1 mm par volt pour une tension anodique de 300 V. L'appareil ainsi utilisé n'est pas purement électrostatique ; on observe, en effet, sur chacune des paires de plaques un courant de fuite donné en fonction de la tension appliquée par la courbe de la fig. 2 ; la capacité entre plaques est de l'ordre de  $10^5$  microfarad, et peut être généralement négligée.

2° Par production d'un champ magnétique perpendiculaire au trajet du pinceau d'électrons : ce champ magnétique peut être produit au moyen de deux petites bobines disposées de part et d'autre de l'ampoule comme l'indique la fig. 1, et parcourues par le courant à étudier. On peut ainsi obtenir, avec 2 bobines ayant les dimensions suivantes : diamètre moyen 48 mm ; écartement 50 mm ; une sensibilité d'environ 1 mm par ampère-tour.



On voit qu'on peut faire dévier le spot du tube oscillographique suivant deux directions perpendiculaires, selon qu'on applique une différence de potentiel à l'une ou l'autre des paires de plaques  $P_x$  et  $P_y$ ; si l'on dispose les bobines déviatrices de manière que l'élongation qu'elles produisent soit parallèle à l'une de ces directions, on pourra faire décrire au spot la courbe de variation d'une tension ou d'un courant en fonction d'une autre tension.

Ce mode d'utilisation permet un certain nombre d'études, en particulier celle des cycles d'hystérésis magnétique ou diélectrique, celle des caractéristiques dynamiques des triodes ou d'autres appareils.

Lorsqu'on se propose d'étudier la variation d'une tension ou d'un courant en fonction du temps, il devient nécessaire d'utiliser une

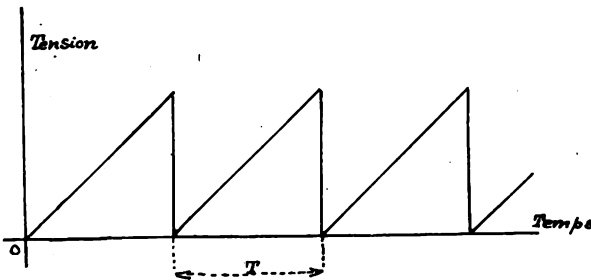


FIG. 3. — Forme type de tension de balayage.

tension auxiliaire, dite *tension de balayage*, dont la variation en fonction du temps soit connue. Si le phénomène à étudier est périodique, on peut faire usage, comme tension de balayage, d'une tension synchrone, ou de période multiple ou sous-multiple : on obtiendra ainsi sur l'écran une courbe stationnaire, d'où l'on pourra déduire la courbe en fonction du temps du phénomène étudié, connaissant la forme de la tension de balayage utilisée. Toutefois, l'interprétation des figures de Lissajous ainsi obtenues est souvent très délicate, surtout si la forme de la tension étudiée est inconnue, et si on a des doutes sur la forme de la courbe développante. En outre, on est obligé à une construction géométrique fastidieuse, et pouvant donner lieu à des erreurs importantes.

Ces inconvénients sont évités complètement si l'on fait usage comme tension de balayage d'une tension en dents de scie, donnée en fonction du temps par la courbe de la fig. 3 : pendant la durée d'une période, la tension croît linéairement, puis retombe brusquement à

sa valeur initiale, recommence à croître de même durant la période suivante, retombe, et ainsi de suite. La période de la tension de balayage peut être soit égale à celle du phénomène étudié, soit égale à un multiple entier de celle-ci.

*On voit facilement que si la période de la tension de balayage est égale à  $n$  fois celle du phénomène étudié, le produit de la composition des deux mouvements du spot sera une courbe immobile représentant  $n$  périodes du phénomène étudié.*

Pour pouvoir étudier à volonté un phénomène électrique périodique, il suffit donc de produire une tension variable en fonction du temps, selon la loi de la fig. 3, faire varier à volonté sa fréquence, et pouvoir la synchroniser sur le phénomène à étudier.

**PRODUCTION DE LA TENSION DE BALAYAGE :** Divers montages ont été proposés dans ce but ; ils utilisent généralement des oscillations électriques de relaxation.

On sait que ces oscillations sont caractérisées non par l'échange d'énergie entre une inductance et une capacité, mais par une accumulation d'énergie dans une partie d'un circuit, suivant un premier régime de fonctionnement, suivie de la dissipation de cette énergie, suivant un régime différent. L'accumulateur d'énergie est généralement un condensateur, se chargeant et se déchargeant entre des limites fixes de tension, la période étant déterminée principalement par la durée de charge ou de décharge, et dépendant par conséquent des constantes du circuit utilisé pour celles-ci.

Les oscillations électriques de relaxation, dont les courbes représentatives se rapprochent de celle de la fig. 3 peuvent être données par des oscillateurs à triodes analogues au multivibrateur, ou par des oscillateurs à tubes à effluves. L'étude de quelques-uns de ces montages a fait l'objet d'un certain nombre de publications importantes de Van der Pol<sup>1</sup>.

Un montage utilisant comme oscillation la charge d'un condensateur variable placé en dérivation aux bornes d'une lampe à néon, à travers une résistance ou une lampe diode chauffée à saturation et appliqué au balayage a été décrit par N. V. Kipping<sup>2</sup>. Aucun dispositif de synchronisation n'est décrit dans cette publication.

(1) Van der Pol: Phil. Mag. 51, 978 (1926). L'onde électrique n° 81 (sept. 1928).

(2) N. V. Kipping : Wave form examination with the Cathode Ray Oscillograph Electrical Communication. July 1924.

Notre dispositif constitue un perfectionnement du précédent ; il s'en distingue <sup>(1)</sup> par l'adjonction d'un dispositif de synchronisation. La facilité de synchronisation constitue d'ailleurs une propriété générale des oscillations de relaxation <sup>(2)</sup>.

D'autres procédés d'obtention de la tension de balayage ont été décrits, fondés sur l'emploi de montages à lampes triodes ou à lampes bigrille, en particulier par E. V. Appleton, R. A. Watson Watt et J. F. Herd <sup>(3)</sup>, et par E. Decaux <sup>(4)</sup>.

Nous allons passer maintenant à une description plus détaillée de notre dispositif de balayage. Il comporte (fig. 4) un condensateur 1, une valve thermionique à 2 électrodes 2, sa batterie 3 et son rhéostat

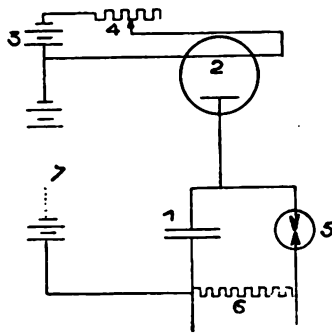


FIG. 4. — Schéma de principe d'un oscillateur de balayage à tubes à effluves.

de chauffage 4, un tube à décharge par effluve 5, une résistance 6 et une source de tension anodique 7 (batterie ou redresseur).

Le tube à décharge 5 doit posséder les propriétés suivantes : lorsqu'on lui applique une tension croissante, l'effluve doit s'amorcer entre ses électrodes pour une valeur  $u_a$  bien déterminée de la tension ; si alors on fait décroître la tension appliquée au tube, l'effluve devra se désamorcer pour une valeur également bien déterminée  $u_d$  de cette tension.

Ceci posé, le mécanisme de l'oscillateur est le suivant : supposons qu'on chauffe le filament de la diode 2, de manière que celle-ci laisse passer son courant de saturation (ce qui se produit si la tension de la

(1) B. F. n° 635353 déposé le 31 mai 1927.

(2) Van der Pol : Nature, 10 sept. 1927.

(3) E. P. n° 235.254.

(4) Decaux : Lampes à 4 électrodes. Bulletin de la S. F. E. fév. 1928.

source 7 est suffisamment élevée) : le condensateur 1 se charge à courant constant, et sa tension s'élève linéairement en fonction du temps, jusqu'à la tension d'amorçage du tube 5 ; celui-ci s'amorce et si sa résistance interne est faible, décharge très rapidement le condensateur 1, jusqu'à ce que la tension aux bornes de celui-ci atteigne la tension de désamorçage du tube 5. La charge du condensateur recommence à nouveau, et ainsi de suite.

On voit donc qu'entre les bornes du condensateur apparaît une tension périodique ayant la forme de la fig. 3. L'amplitude de variation de cette tension a pour valeur  $u_a - u_d$ . Si l'on désigne par  $I$  le courant de saturation de la diode 2, par  $\tau$  la durée de la décharge, la période  $T$  de la tension étudiée aura pour expression

$$T = \frac{C (u_a - u_d)}{I} + \tau = \frac{1}{f} \quad (1)$$

$C$  étant la capacité du condensateur.

On peut donc régler la période d'oscillation, soit en faisant varier  $I$ , par manœuvre du rhéostat de chauffage 4, soit en constituant  $C$  par un condensateur variable.

La tension aux bornes du condensateur 1 répond donc en partie aux conditions nécessaires que doit remplir une tension de balayage, pour qu'elle les remplisse complètement, il faut encore pouvoir la synchroniser : c'est le rôle de la résistance 6, aux bornes de laquelle on doit appliquer la tension de synchronisation, et nous examinerons plus loin le mécanisme de cette dernière.

Un montage équivalent au précédent pourrait être réalisé en utilisant une charge brusque d'un condensateur à travers un tube à effluve, suivie d'une décharge à courant constant à travers une diode chauffée à saturation.

Examinons maintenant l'emploi comme tension de balayage de la tension aux bornes du condensateur 1 (fig. 4) ; appliquons cette tension à la paire de plaques  $P_x$  ; nous aurons ainsi un axe des temps dont la longueur sera égale à l'élongation du spot pour une tension égale à la différence  $u_a - u_d$  entre les tensions d'amorçage et de désamorçage du tube à effluve. L'échelle des temps sera donc d'autant plus grande que cette différence sera elle-même plus grande ; on ne devra pas chercher à l'augmenter trop, de manière à ne pas déborder trop l'écran, et à ne pas perdre trop de luminosité ; tout dépend du tube à décharge adopté.

## CHOIX DU TUBE A EFFLUVES DE L'OSCILLATEUR DE BALAYAGE

La condition d'écart entre tension d'amorçage et de désamorçage n'est pas la seule que doive remplir le tube à effluve utilisé.

En effet, les tubes à effluve présentent la propriété suivante : supposons qu'on cherche à augmenter la fréquence de l'oscillateur, par augmentation du courant de charge  $I$  ; l'expérience montre qu'on ne peut dépasser en régime oscillatoire une valeur limite pour celui-ci ; au-delà de cette valeur, un amorçage permanent en courant continu se produit dans le tube.

On devra donc choisir un modèle de tube à effluve présentant un écart convenable entre les tensions d'amorçage et de désamorçage, et permettant en outre le passage en régime oscillatoire d'un courant moyen aussi élevé que possible ; cette seconde condition permet d'accéder aux fréquences élevées ; nous allons voir en outre qu'elle permet de conserver pour celles-ci la proportionnalité du développement en fonction du temps.

En effet, remarquons que l'on doit appliquer la tension de balayage à une paire de plaques du tube oscillographique ; or, nous avons vu qu'entre ces plaques circule un courant donné en fonction de la tension par la courbe de la fig. 2. Pour que le développement reste proportionnel au temps, il importe que la tension de balayage ne soit pas déformée sensiblement par ce débit, ou encore que le courant de charge du condensateur reste grand devant le courant de fuite entre plaques (30 microampères environ au maximum).

Nous avons d'abord utilisé comme tubes à effluve des lampes veilleuses au néon (1) : la différence  $u_a - u_d$  pour un tube de ce genre est voisine de 17 V, la tension d'amorçage étant de 80 à 85 V. Pour obtenir une échelle des temps suffisante, il est nécessaire de connecter en série au moins 3 de ces tubes.

En ce qui concerne les courants maxima admissibles en régime oscillatoire, un tel ensemble supporte pour une capacité  $C = 0,05 \mu F$  une intensité maximum  $I = 200 \mu A$  environ, et pour  $C = 0,001 \mu F$  une intensité  $I = 50 \mu A$  seulement ; nous voyons immédiatement que si la proportionnalité au temps est assez bonne dans le premier cas, elle est très défectueuse dans le second. Calculons les fréquences correspondantes, en utilisant la formule (1), et en négligeant le temps  $\tau$

---

(1) Type « Osram ».

de décharge ; on obtient ainsi pour les fréquences limites en adoptant pour l'ensemble des 3 lampes en série  $u_a - u_d = 50$  V

$$\text{dans le premier cas } f = \frac{200 \times 10^{-6}}{0,05 \times 10^{-6} \times 50} = 80 \text{ périodes par seconde}$$

$$\text{dans le second cas } f = \frac{50 \times 10}{0,001 \times 10^{-6} \times 50} = 1\,000 \text{ périodes par seconde.}$$

On voit donc que l'ensemble de 3 lampes veilleuses à néon peut convenir à la rigueur pour l'étude des fréquences industrielles, mais se prête fort mal à l'étude des fréquences musicales.

Nous avons donc étudié systématiquement la question du tube à décharge applicable à notre oscillateur, et notre choix s'est porté sur des tubes à 2 électrodes de forme convenable, remplis d'argon pur sous une pression déterminée. En faisant varier cette pression, on peut obtenir des tubes permettant aux oscillateurs de fonctionner à des fréquences variant de quelques périodes par seconde à 50 000 périodes par seconde, tout en conservant une proportionnalité au temps très satisfaisante. Voici quelques données numériques sur ces tubes à argon :

Leur tension d'amorçage est d'environ 250 V, soit environ la même que celle de 3 lampes à néon en série ; la différence entre les tensions d'amorçage et de désamorçage est d'environ 90 V, ce qui permet d'obtenir une échelle des temps presque double de celle obtenue avec les lampes à néon. En outre, à condition d'associer à une capacité déterminée un tube renfermant une pression d'argon convenable, on peut obtenir des oscillations avec des courants de charge beaucoup plus élevés qu'avec les lampes à néon, et atteignant 600  $\mu$  A, quelle que soit la capacité utilisée. La pression d'argon nécessaire au bon fonctionnement de l'oscillateur est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation à atteindre est elle-même plus élevée, c'est-à-dire que la capacité utilisée est plus faible. On peut d'ailleurs couvrir toute l'échelle des fréquences d'oscillation avec 2 modèles de tubes, l'un convenant jusqu'à 5 000 p.s., l'autre de 5 000 à 50 000.

Le condensateur de l'oscillateur devra avoir une capacité d'autant plus faible que la fréquence à obtenir est plus élevée :

$$\text{Avec } C = 0,1 \mu F$$

$$I = 0,6 \times 10^{-3} A$$

$$\text{on a } f = \frac{0,6 \times 10^{-3}}{0,1 \times 10^{-6} \times 90} = 67.$$

Avec  $C = 0,001 \mu F$

$$f = 6\,700.$$

La fréquence 50 000 est obtenue en réduisant la capacité à celle du tube et de ses connexions.

On voit que dans tous les cas, les courants moyens de charge utilisables avec les tubes à argon en régime oscillatoire sont suffisamment grands vis-à-vis du courant de fuite entre plaques déviatrices pour conserver une excellente proportionnalité au temps du balayage. La fréquence propre d'oscillation qu'on peut atteindre étant de 50 000 périodes par seconde, on voit qu'on peut facilement étudier des fréquences de 250 000, pour lesquelles une période représentera

$$\frac{90 \text{ mm}}{5} = 18 \text{ mm}.$$

Nous allons examiner maintenant comment on peut synchroniser l'oscillateur de balayage sur la fréquence à étudier.

#### SYNCHRONISATION DE L'OSCILLATEUR DE BALAYAGE

Nous avons supposé jusqu'ici le montage de la fig. 4 en régime d'oscillation libre ; supposons maintenant qu'on applique aux bornes de la résistance 6 une tension alternative de valeur convenable, provenant d'une source extérieure. L'expérience montre que, si la fréquence de cette tension alternative est suffisamment voisine de la fréquence propre de l'oscillateur ou d'un de ses harmoniques, un phénomène de synchronisation se produit : l'oscillateur ajuste sa fréquence soit sur la fréquence de la source, soit sur un sous-multiple de celle-ci : cette propriété n'est d'ailleurs pas spéciale au présent montage : elle constitue une propriété générale des oscillateurs à relaxation.

Examinons de plus près le mécanisme de cette synchronisation : il est tout d'abord facile de voir que *l'oscillateur ne peut se synchroniser que sur une fréquence sous-multiple de la fréquence excitatrice, ou égale à celle-ci et que la synchronisation ne pourrait se stabiliser si la décharge dans le tube était instantanée.*

En effet, considérons (fig. 5) l'ensemble du condensateur et de son circuit de décharge.

Désignons par  $v$  la tension instantanée aux bornes du condensateur par  $u$  celle aux bornes du tube à effluve, par  $w$  la valeur instantanée de la tension de synchronisation, et par  $\varepsilon$  la résistance du circuit de décharge extérieur au tube ; soit enfin  $j$  le courant de décharge.

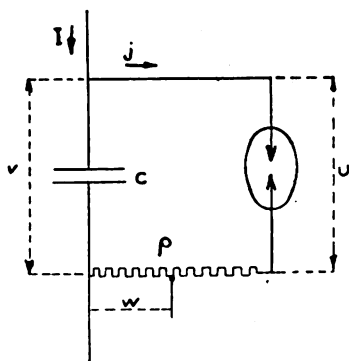


FIG. 5

Supposons qu'à l'origine des temps, la différence de potentiel aux bornes du condensateur soit représentée par l'ordonnée OP (fig. 6); établissons dans le circuit de charge un courant constant  $I$  ; on a

$$C \frac{dv}{dt} = I.$$

D'où, par intégration 
$$v = \frac{I}{C} t + v_0$$

$v_0$  désignant la valeur OP de la différence de potentiel à l'origine des temps. La variation en fonction du temps de la tension  $v$  sera représentée par la droite PM d'équation

$$v = v_0 + \frac{I}{C} t.$$

Le tube à décharge s'amorcera lorsqu'on aura :

$$v = u_a + w$$

c'est-à-dire au point d'intersection de la courbe définie par cette équation et de la droite PM. Supposons alors que la décharge soit instantanée, la tension aux bornes du condensateur tombera brusquement à la valeur

$$v' = u_a + w$$

correspondant au point D de désamorçage.



Une nouvelle période de charge du condensateur commencera alors, correspondant à la droite DN.

On voit immédiatement que l'oscillation forcée ne peut être périodique en conservant la forme type nécessaire au balayage que si l'on a

$$nT \frac{I}{C} = u_a - u_d$$

T désignant la période de la tension  $w$ .

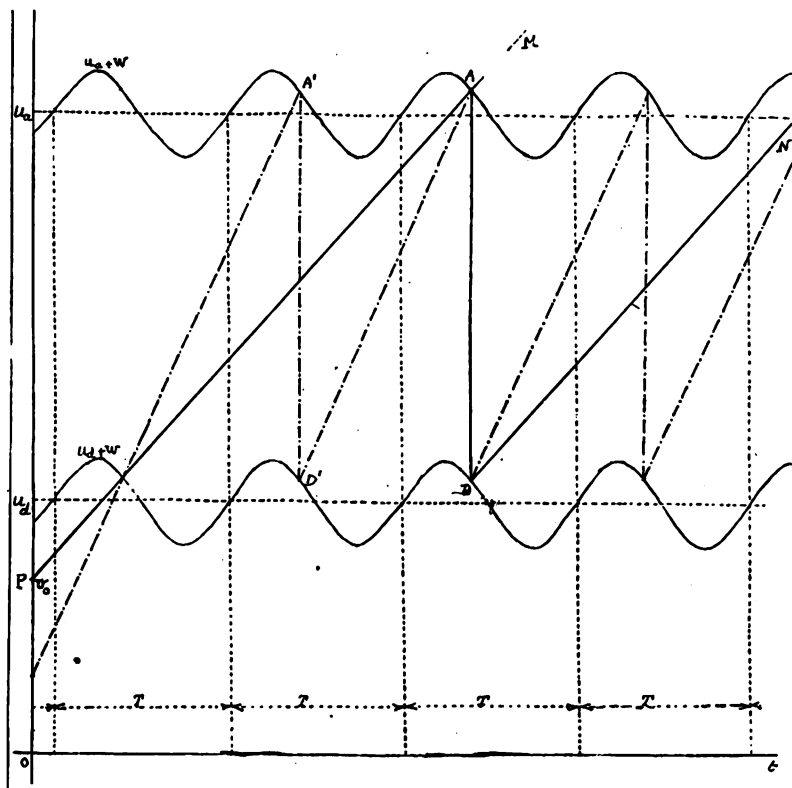


FIG. 6

De plus, la fréquence la plus élevée que peut atteindre l'oscillation est celle de  $w$ , correspondant à l'oscillation figurée en traits mixtes sur la fig. 6.

Les régimes périodiques ainsi définis n'ont pas plus de chance de se réaliser que d'autres dans l'hypothèse d'une décharge instantanée et l'on n'aperçoit ainsi aucune cause de stabilisation.

Il est donc nécessaire de faire intervenir dans la théorie de la synchronisation la durée  $\tau$  de la décharge dans le tube à effluve. Cher-

chons tout d'abord à déterminer les facteurs pouvant influer sur cette durée, en supposant que  $C$  et  $\rho$  aient des valeurs déterminées. Pour cela, supposons la décharge en cours ; on a avec les notations précédentes :

$$\left| \begin{array}{l} v = u + w + \rho j \\ C \frac{dv}{dt} = 1 - j. \end{array} \right.$$

De ces équations, on déduit :

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{du}{dt} + \frac{dw}{dt} + \rho \frac{dj}{dt} \\ \text{d'où} \quad \frac{du}{dt} + \rho \frac{dj}{dt} + \frac{j}{C} &= \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

On peut supposer que la décharge dans le tube, sans être instantanée, dure néanmoins un temps assez court pour qu'on puisse donner à  $\frac{dw}{dt}$  une valeur constante. On remarque de plus que la valeur initiale de  $u$  est fixe, étant égale à la tension d'amorçage  $u_a$ .

L'équation différentielle de la décharge (2) montre donc,  $\rho$  et  $C$  étant donnés, que l'allure de cette décharge, et par conséquent, sa durée  $T$ , ne dépend que de la quantité

$$\frac{1}{C} - \frac{dw}{dt}.$$

Nous admettrons donc pour la durée  $\tau$ , un développement en série limité aux deux premiers termes de la forme :

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 + a \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right) \right]. \quad (3)$$

Supposons maintenant l'oscillation synchronisée sur une fréquence sous-multiple de celle de  $w$  ; soit  $nT$  sa période. Elle se compose de deux parties : une période de charge du condensateur, ayant pour durée  $nT - \tau$ , et une période de décharge de durée  $\tau$ . Egalons la variation de potentiel aux bornes du condensateur pendant ces deux intervalles.

Pendant la charge, la tension aux bornes du condensateur s'accroît de :

$$\frac{1}{C} (nT - \tau).$$

Considérons maintenant l'intervalle de décharge : à l'amorçage, on a

$$v = u_a + w$$

au désamorçage : 
$$v' = u_d + w + \tau \frac{dw}{dt}$$

en supposant comme plus haut la durée  $\tau$  très petite. On a donc l'équation

$$\frac{1}{C} (nT - \tau) = u_a - u_d - \tau \frac{dw}{dt}$$

ou 
$$nT \frac{1}{C} = u_a - u_d + \tau \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right)$$

ou, en substituant à  $\tau$  son expression donnée par l'équation (3) :

$$nT \frac{1}{C} = u_a - u_d + \tau_0 \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right) \left[ 1 + a \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right) \right] \quad (4)$$

Telle est la condition qui doit relier ensemble 1 et  $\frac{dw}{dt}$  pour que l'oscillation reste synchronisée sur la période  $nT$ .

Nous pouvons maintenant discuter la stabilité de cette synchronisation. Pour cela, reprenons (fig. 7) l'ensemble des courbes.

$$v = u_a + w$$

et 
$$v = u_d + w$$

et considérons un régime périodique, synchronisé par exemple sur la période de  $w$  ; supposons qu'à l'origine des temps se produise un accroissement très petit de 1, déplaçant le point d'amorçage qui aurait dû se trouver en A, jusqu'à la position A'. Le résultat de cette variation sera une avance de plus en plus grande des amorçages successifs, et le régime périodique ne pourra s'établir à nouveau que si on rencontre lors d'un de ces amorçages une valeur de  $\frac{dw}{dt}$  qui soit liée à la nouvelle valeur de 1 par l'équation (4).

Nous sommes donc amenés à étudier les variations des racines en  $\frac{dw}{dt}$  de l'équation (4) en fonction des variations de 1 ; pour cela, ordonnons cette équation par rapport à  $\frac{dw}{dt}$  ; elle s'écrit :

$$a \left( \frac{dw}{dt} \right)^2 - \left( 1 + 2a \frac{C}{1} \right) \frac{dw}{dt} - \frac{C}{1} \left( 1 + a \frac{1}{C} - \frac{nT}{\tau_0} \right) + \frac{u_a - u_d}{\tau_0} = 0. \quad (5)$$

Donnons maintenant à 1 une variation infiniment petite  $\Delta 1$  ; soit  $\Delta \frac{dw}{dt}$  la variation correspondante de  $\frac{dw}{dt}$  ; on déduit de l'équation (5) la relations suivante entre ces deux variations :

$$\Delta \frac{dw}{dt} \left[ 1 + 2a \left( \frac{C}{1} - \frac{dw}{dt} \right) \right] = \frac{\Delta 1}{C} \left[ 1 + 2a \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right) - \frac{nT}{\tau_0} \right]$$

$$\text{ou} \quad \Delta \frac{dw}{dt} = \frac{\Delta I}{C} \left\{ 1 - \frac{nT}{\tau_0 \left[ 1 + 2a \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right) \right]} \right\}. \quad (6)$$

La quantité  $\tau_0 \left[ 1 + 2a \left( \frac{1}{C} - \frac{dw}{dt} \right) \right]$  est de l'ordre de grandeur du temps de décharge  $T$ , et comme celui-ci est très petit devant la période  $nT$ , il en résulte que le coefficient de  $\frac{\Delta I}{C}$  dans le second membre de l'équation (6) est négatif. Les quantités  $I$  et  $\frac{dw}{dt}$  devront donc varier en sens inverse pour que le synchronisme subsiste.

Or, nous avons vu plus haut que l'effet de l'accroissement de  $I$  est de provoquer l'amorçage de plus en plus tôt dans les périodes successives. Pour que la synchronisation soit stable, il faut donc que  $\frac{dw}{dt}$  décroisse lorsqu'on remonte dans le temps, ou encore croisse en fonction de celui-ci.

Ainsi les régimes stables d'oscillation synchronisée doivent correspondre à l'« accrochage » des points d'amorçage successifs dans des parties de la courbe  $v = u_a + w$ , où la dérivée  $\frac{dw}{dt}$  est croissante en fonction du temps.

Supposons maintenant que la tension de synchronisation  $w$  soit sinusoïdale ;  $W$  étant sa valeur maximum, on a :

$$w = W \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

De la théorie précédente, il résulte que les points d'amorçage pourront se stabiliser sur toutes les parties en trait gras de la courbe  $v = u_a + w$  (fig. 7) qui correspondent à une dérivée  $\frac{dw}{dt}$  croissante en fonction du temps. En donnant à  $I$  des valeurs croissantes, on pourra observer des régimes stables correspondant à des courbes telles que 3 (période  $3T$ ), 2 (période  $2T$ ) ou 1 (période  $T$ ).

Essayons de nous rendre compte de la stabilité relative de ces divers régimes, ainsi que de l'influence de la position des points d'amorçage sur cette stabilité.

Considérons donc une oscillation synchronisée de période  $nT$ , les points d'amorçage correspondant à une valeur  $w_0$  de  $w$  ; soit  $I_n$  la valeur du courant  $I$  relative à ce régime. Supposons que ce courant subisse une variation infiniment petite  $\Delta I_n$ . Les points d'amorçage se

déplaceront corrélativement d'un intervalle de temps  $\Delta t$ . La variation correspondante de  $\frac{dw}{dt}$  aura pour valeur :

$$\Delta \frac{dw}{dt} = - \frac{4\pi^2}{T^2} w_0 \Delta t. \quad (7)$$

Le régime primitif était d'autant plus stable qu'à une variation relative très importante de  $I_n$  correspond un plus faible décalage rela-

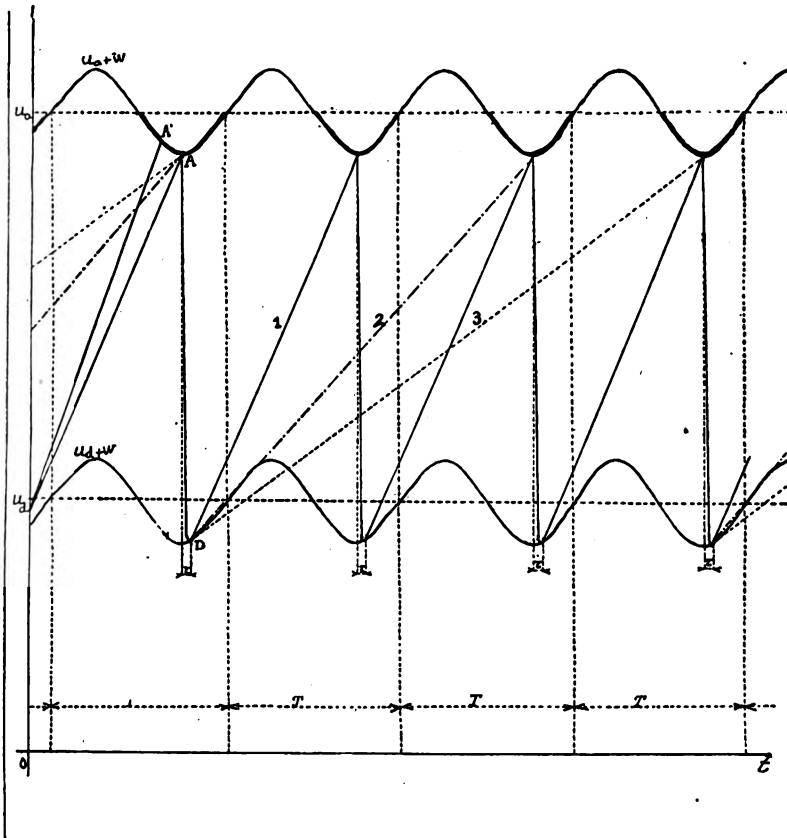


FIG. 7

tif de la courbe synchronisée dans le temps. On peut donc prendre pour mesure de la stabilité la quantité

$$S = - \frac{\Delta I_n}{I_n} \times \frac{T}{\Delta T}.$$

Evaluons cette quantité, en supposant pour simplifier le temps de décharge  $\tau$  indépendant de  $\frac{dw}{dt}$ , c'est-à-dire  $a=0$   $\tau=\tau_0$ . Dans

ce cas, la formule (6) s'écrit

$$\Delta \frac{dw}{dt} = - \frac{\Delta I_n}{C} \frac{nT - \tau_o}{\tau_o}.$$

On en déduit, en la rapprochant de l'équation (7).

$$\frac{4\pi^2}{T^2} w_o \Delta t = \frac{\Delta I_n}{C} \frac{nT - \tau_o}{\tau_o}.$$

Or, en première approximation, on peut écrire :

$$nT - \tau_o = \frac{C}{I_n} (u_a - u_d).$$

D'où finalement l'expression de la stabilité :

$$S = - \frac{\Delta I_n}{I_n} \frac{1}{\Delta t} = - 4\pi^2 \frac{w_o}{u_a - u_d} \frac{\tau_o}{T}. \quad (8)$$

Aussi, la stabilité d'une oscillation synchronisée est d'autant plus grande qu'elle correspond à une valeur absolue plus élevée de  $w_o$  ; les points d'amorçage de stabilité maximum correspondent aux sommets inférieurs de la sinusoïde

$$v = u_a + w.$$

La valeur maximum de la stabilité a pour expression :

$$S = 4\pi^2 \frac{W}{u_a - u_d} \frac{\tau_o}{T}.$$

Remarquons que dans les expressions précédentes ne figure point le coefficient  $n$  ; les divers régimes obtenus en synchronisant un oscilateur sur les sous-multiples successifs de la fréquence excitatrice ont des stabilités égales.

La stabilité croît de plus avec la valeur de la force électromotrice de synchronisation, et avec la valeur du rapport  $\frac{\tau}{T}$  du temps de décharge à la période de cette force électromotrice.

La théorie précédente n'est qu'assez grossièrement approchée : en particulier, on a supposé la durée  $\tau$  de la décharge suffisamment petite pour qu'on puisse confondre l'accroissement de  $w$  avec  $\tau \frac{dw}{dt}$  ; de plus, dans la discussion de la stabilité, on a supposé la durée de décharge constante.

Malgré ces approximations, l'expérience vérifie bien les conclusions précédentes, quant aux zones de stabilité des points d'amorçage et à la stabilité des divers régimes.

Une vérification quantitative de la théorie précédente nécessiterait la mesure et l'étude des variations du temps de décharge  $\tau$  ; or, cette

mesure est très difficile, la fin de la décharge n'apparaissant pas nettement sur les courbes de tension de balayage. On voit toutefois immédiatement en examinant celles-ci, que le rapport  $\frac{\tau}{T}$  est beaucoup plus petit en basse fréquence qu'en haute fréquence, ce qui explique la stabilité plus grande des oscillations synchronisées sur les fréquences élevées. Le rapport  $\frac{\tau}{T}$  peut atteindre 0,2 pour les plus hautes fréquences de balayage accessibles (50 000).

#### RÉALISATION PRATIQUE DU MONTAGE DE L'OSCILLOGRAPHE

Nous examinerons maintenant la combinaison de l'ampoule oscillographique et de l'oscillateur de balayage que nous venons d'étudier. L'ensemble est disposé de manière à utiliser une seule batterie de chauffage pour l'ampoule oscillographique et pour la diode de l'oscillateur ; de plus, les deux sources de tension anodique utilisées possèdent une partie commune.

La fig. 8 donne le schéma de principe de l'ensemble des circuits.

La source 3 chauffe simultanément le filament 2 du tube oscillographique 1 et celui de la diode 11. Les intensités de chauffage peuvent être réglées par les rhéostats 4 et 12, la première étant mesurée par l'ampèremètre 5. Le canon à électrons 6 est réuni directement à la cage de l'oscillographe, et porté à un potentiel de 250 à 300 V par rapport au filament par la source 7, par l'intermédiaire de l'interrupteur 18, et de la résistance de protection 8, shuntée par un condensateur écouant la haute fréquence ; 9 et 10 sont les deux paires de plaques déviatrices, commandées l'une par l'oscillateur de balayage, et l'autre par la tension à étudier. On reconnaît encore les autres organes de l'oscillateur : sa source de tension anodique, constituée par l'ensemble des deux sources 7 et 14 connectées en série, la source 14 retranchant sa force électromotrice de la tension aux bornes du condensateur d'oscillation 13, de manière à ramener l'axe des temps dans les limites de l'écran ; 15 est l'éclateur à argon et 16 le potentiomètre permettant le réglage de la force électromotrice de synchronisation. Le montage comporte encore divers interrupteurs : l'un 17 coupant les circuits de chauffage, l'autre 18 coupant la tension anodique ; deux inverseurs unipolaires 19 et 20 permettent de relier respectivement les plaques déviatrices 9 et 10 soit à leurs sources d'alimentation respectives, soit à la cage de l'appareil ; enfin un commutateur

unipolaire à trois directions permet de mettre en communication successivement et rapidement les plaques déviatrices 10 avec les différentes sources de potentiels à étudier en même temps.

L'ensemble des organes précédents, à l'exclusion des sources et du condensateur d'oscillation 15 est réuni dans une boîte métallique en aluminium ; cette boîte est pourvue d'un couvercle formé de la face avant et d'une partie de la face supérieure ; ce couvercle une fois

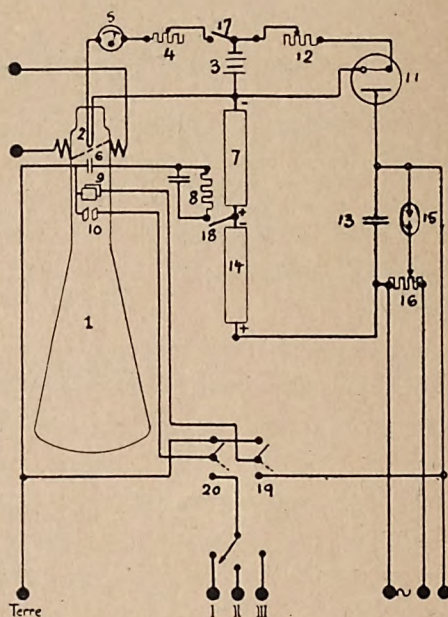


FIG. 8. — Schéma de principe de l'ensemble des circuits de l'oscillographe.

levé, démasque une sorte de pupitre incliné sur lequel apparaît en saillie l'écran de l'ampoule oscillographique. Au-dessous de ce pupitre se trouve un tableau d'ébonite portant les organes de commande et les bornes d'alimentation, disposés comme l'indique la fig. 9 : 1, 2 et 3 sont les bornes d'arrivée des diverses tensions à étudier, qui doivent comporter un point commun qu'on réunira à la borne « Terre » ; deux bornes, marquées I sont prévues pour l'étude des courants : elles sont réunies à des alvéoles placées vers la base de l'ampoule oscillographique, on peut placer dans ces alvéoles une barrette à broches supportant des bobines déviatrices ; une porte ménagée à la face arrière de l'appareil permet le changement de ces bobines.



dont on peut proportionner le nombre des spires à l'intensité à étudier (jusqu'à 3 A environ).

**Les sources d'alimentation doivent être connectées comme suit :**

L'accumulateur de chauffage (susceptible de débiter un courant de 1,5 A environ) doit être réuni aux bornes  $-4$  et  $+4$ .

Les bornes —300, +300 doivent être connectées à une source de tension continue de 300 V environ, qu'on devra pouvoir faire va-

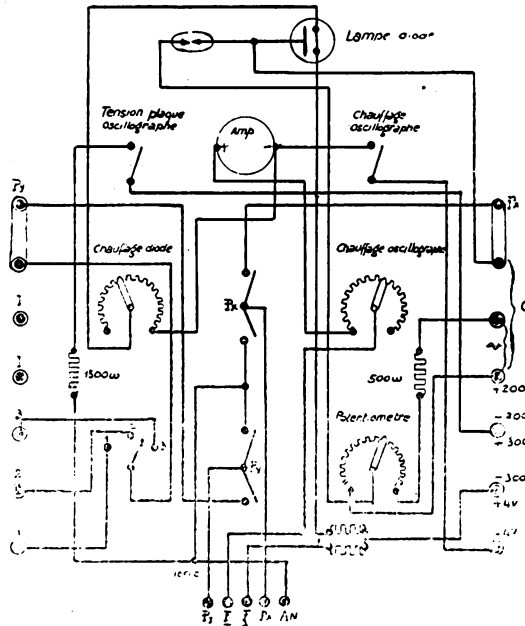


FIG. 9. — Disposition du panneau de commande et schéma de la boîte d'oscillographe.

rier depuis 240 V par des prises appropriées : une ampoule oscillographique neuve, fonctionnant vers 240 V environ, on doit en effet au fur et à mesure de son vieillissement augmenter la tension anodique pour conserver la luminosité du spot. Les bornes  $-200$ .  $+200$  doivent être réunies à une source de tension continue d'environ 200 V, réglable également, pour permettre le déplacement des courbes sur l'écran, parallèlement à l'axe des temps.

Les bornes marquées  $\sim$  doivent être connectées au secondaire d'un transformateur d'isolement, au primaire duquel on appliquera la tension de synchronisation ; une tension secondaire d'une vingtaine de volts convient largement dans tous les cas : on réglera la fraction

servant à la synchronisation à la valeur convenable par le potentiomètre. La force électromotrice de synchronisation nécessaire est d'autant plus faible que la fréquence étudiée est plus élevée : ainsi, au-dessus de 1 000 périodes par seconde, on peut se contenter d'une tension de quelques volts seulement.

Les bornes marquées « C » devront être réunies à un condensateur de capacité convenable, dépendant du domaine de fréquences utilisé.

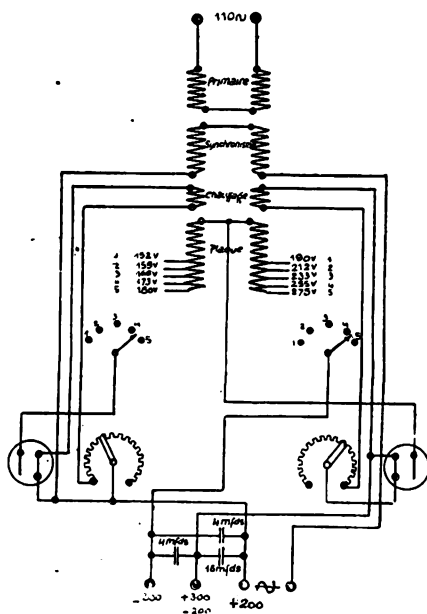


FIG. 10. — Schéma de principe du redresseur pour l'alimentation de l'oscillographe.

On utilisera de préférence une valeur de la capacité voisine de celle donnée par la formule :

$$C = \frac{600}{90f} \mu F$$

$f$  étant la fréquence à étudier ; cette formule est déduite de la formule (1) en supposant  $I=600 \mu A$ ,  $n_a-u_d=90 V$ . Pour des fréquences de quelques milliers de périodes par seconde et au-delà, le mieux est d'adopter un condensateur variable à lames de  $0,001 \mu F$ , de préférence pourvu d'une démultiplication et présentant une capacité résiduelle aussi faible que possible. On peut ainsi atteindre des fréquences d'oscillation de 50 000 périodes par seconde.

La borne  $P_x$  est réunie par une barrette amovible au système de balayage ; cette barrette peut être enlevée pour permettre l'utilisation de l'appareil avec un autre dispositif de développement.

Enfin, la borne marquée  $P_y$  et celle qui lui est réunie normalement par une barrette permettent, en remplaçant cette dernière par une source de tension continue variable (piles par exemple) de déplacer les courbes dans le sens perpendiculaire à l'axe des temps.

Les sources de tensions anodiques utilisables pour l'oscillographe peuvent être, soit des batteries de piles, soit préférablement des redresseurs thermioniques, dont nous avons étudié un modèle spécial. La fig. 10 donne le schéma de principe de cet appareil, susceptible de fournir simultanément les deux tensions anodiques réglables, et une tension de synchronisation, tout en pouvant s'alimenter sous une tension alternative de 110 volts, de fréquence supérieure ou égale à 25.

Ce redresseur présente la particularité due au fait du faible débit et de la nécessité d'un filtrage assez peu poussé, de ne comporter que des filtres à capacité pure. Il est contenu dans une boîte analogue à celle de l'oscillographe, et peut être connecté rapidement à celui-ci par un jeu de fiches et de cordons colorés.

On dispose ainsi d'un ensemble d'appareils d'un maniement très simple, permettant un montage très rapide. La fig. 11 représente l'assemblage de la boîte d'oscillographe, de son redresseur d'alimentation de l'accumulateur de chauffage ; on distingue également une batterie de piles permettant le déplacement de l'axe des temps perpendiculairement à lui-même. Les poids des divers organes se répartissent comme suit : boîte d'oscillographe : 6 kg 2 ; redresseur : 8 kg 1 ; accumulateur : 4 kg soit un poids total de 18 kg environ.

#### MODE D'EMPLOI DE L'APPAREIL

Le mode d'emploi de l'oscillographe est le suivant :

L'appareil ayant été connecté aux sources d'alimentation, et aux sources de tension et de courant à étudier, on ferme l'interrupteur de chauffage, et l'interrupteur de tension anodique de la boîte d'oscillographe, les inverseurs  $P_x$  et  $P_y$  (fig. 9) étant disposés de manière à réunir les deux plaques déviatrices à la cage de l'instrument. On manœuvre alors le rhéostat de chauffage jusqu'à l'obtention d'un spot satisfaisant, puis l'inverseur  $P_x$ , ce qui fait apparaître l'axe des

temps. On règle alors la tension appliquée entre bornes  $-200 +200$ , de manière à placer convenablement l'axe des temps dans l'écran.

Si l'on doit étudier une tension, il suffit de l'appliquer entre l'une des bornes 1, 2 et 3 et la borne « Terre », et de manœuvrer l'inverseur  $P_7$  pour en faire apparaître la courbe sur l'écran. La tension de synchronisation étant appliquée aux bornes  $\sim$ , le réglage du rhéostat de chauffage de la diode permet d'immobiliser la courbe et d'en faire apparaître à volonté tel nombre de périodes que l'on désire.

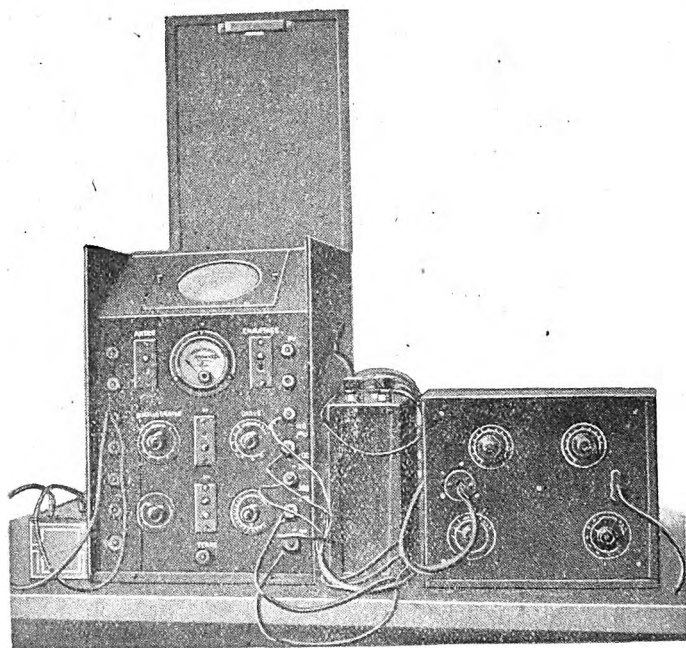


FIG. 11

L'étude d'un courant se fait d'une manière analogue: il suffit de le faire passer dans les bobines déviatrices par l'intermédiaire des bornes « I ».

La courbe du phénomène périodique étudié étant immobilisée sur l'écran à l'échelle convenable, on peut l'observer à volonté dans une obscurité relative. Pour la plupart des recherches courantes de laboratoire, on peut se dispenser de photographier les courbes, et se contenter de les calquer; on effectuera avantageusement ce calque en se servant de cellophane mince (épaisseur 0,03 mm par exemple) dont

la transparence est parfaite, ce qui permet de ne rien perdre de la lumière de l'écran. Un dispositif spécial a été prévu sur le pupitre de l'oscillographe, pour permettre d'immobiliser et de tendre une feuille de cellophane sur le fond de l'ampoule.

Pour des relevés plus importants, on peut photographier les courbes : on devra se placer alors dans l'obscurité, et braquer un appareil photographique sur l'écran. On devra employer des plaques de sensibilité aussi grande que possible (les plaques Lumière « Opta » conviennent parfaitement) et un objectif à grande ouverture ; le temps de pose à employer varie avec la dispersion de la courbe sur l'écran : sa valeur est généralement de une à plusieurs minutes.

Dans le cas de recherches quantitatives, il est bon de graduer l'écran, en faisant tracer au spot successivement des lignes équipotentielles parallèles à l'axe des temps et perpendiculaires à cet axe ; cette méthode est applicable aussi bien au calque qu'au relevé photographique.

#### APPLICATIONS A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES

L'appareil que nous venons de décrire présente des avantages notables sur les oscillographes mécaniques pour l'étude des phénomènes périodiques : nous allons en examiner quelques-uns.

I. — *L'énergie nécessaire au fonctionnement de l'appareil est extrêmement faible* ; elle comprend deux parties :

1° L'énergie nécessaire à la déviation du spot : dans le cas de l'étude d'une tension, si celle-ci est suffisamment faible pour que la courbe ne déborde pas l'écran, le courant nécessaire ne dépasse pas 30 microampères. Si la tension est trop grande pour être étudiée directement, on peut, pour la réduire, faire usage d'un potentiomètre non inductif, dont le débit pourra rester de l'ordre de 0,6 milliampère suffisamment supérieur au débit des plaques pour que celui-ci n'introduise pas de déformation ;

2° L'énergie nécessaire à la synchronisation : cette énergie est d'autant plus faible que la fréquence étudiée est plus élevée ; dans le cas le plus défavorable, on pourra synchroniser par une tension de 20 V aux bornes de la résistance de synchronisation dont la valeur est 1 500 ohms : l'énergie nécessaire sera donc environ 0,27 W. Pour des fréquences musicales, une tension de 5 V, et une énergie de 0,017 W

suffiront. Si on ne dispose pas d'une puissance suffisante, on peut utiliser un étage d'amplification par triode pour l'alimentation du primaire du transformateur de synchronisation ; l'amplificateur utilisé peut être étudié très sommairement, car la déformation qu'il peut apporter n'offre aucun inconvénient. L'énergie nécessaire à la synchronisation se réduit alors à celle nécessaire pour la commande de la grille d'une triode.

Parmi les applications que peut permettre à l'oscillographe cathodique la faible énergie qu'il nécessite, on peut citer les suivantes :

1° Etude de la composante alternative d'une tension redressée faiblement ondulée : on peut utiliser à cet effet le montage de la fig 12 : en dérivation aux bornes de la source à étudier, on place l'ensemble

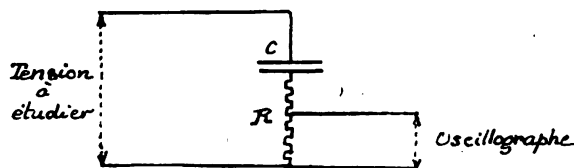


FIG. 12. — Etude de la composante alternative d'une tension redressée.

d'un condensateur C et d'une résistance R ; l'oscillographe est appliqué à une partie de cette résistance. Si  $\omega$  désigne la plus faible pulsation présente dans la tension redressée, et si l'on a

$$\frac{1}{\omega C} \ll R$$

on obtiendra, aux bornes de la résistance R la composante alternative cherchée. On devra toutefois utiliser une valeur de R telle que le débit de la composante alternative dans cette résistance soit grand devant le courant de fuite entre plaques déviatrices.

2° Etude d'une force électromotrice systématiquement déformée, en vue de son développement en série de Fourier ; on sait que le calcul précis des amplitudes des divers harmoniques à partir d'une courbe enregistrée n'est pas toujours facile, surtout si leurs valeurs relatives par rapport au terme fondamental sont faibles. Il y a donc intérêt, en vue d'une plus grande précision, à amplifier les harmoniques par rapport au terme fondamental, et dans un rapport d'autant plus grand que leur rang est plus élevé ; diverses méthodes ont été décrites dans

ce but par M. Blondel : nous allons examiner l'une d'entre elles, dans laquelle on multiplie les amplitudes des harmoniques successifs par leur rang, cette méthode s'appliquant d'une manière très avantageuse à notre appareil :

Soit à étudier une force électromotrice  $e$ , de pulsation  $\omega$  ; soient  $e_1, e_2 \dots e_p$  les valeurs efficaces des harmoniques successifs qui la composent. Appliquons cette force électromotrice aux bornes d'un circuit composé d'une capacité  $C$  et d'une résistance  $R$  (fig. 12). L'harmonique de rang  $p$ , et de pulsation  $p\omega$  donne naissance dans ce circuit à un courant :

$$I_p = \frac{e_p}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{p\omega C}\right)^2}}$$

et il apparaît aux bornes de la résistance  $R$  la différence de potentiel :

$$E_p = \frac{R e_p}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{p\omega C}\right)^2}} = \frac{p\omega C R e_p}{\sqrt{1 + p^2 \omega^2 C^2 R^2}}.$$

On voit donc que, sous la réserve que le dénominateur de cette expression s'écarte très peu de l'unité, chaque harmonique apparaît aux bornes de la résistance  $R$  en ayant sa valeur relative par rapport au terme fondamental multipliée par son rang. Nous pouvons donc utiliser la tension aux bornes de la résistance  $R$  comme tension déviatrice.

Supposons qu'on admette une valeur relative de 2 0/0 pour l'harmonique  $p$  ; on aura

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + p^2 \omega^2 C^2 R^2} &= 0,98 \\ \text{d'où} \quad p\omega CR &= 0,194 \\ \omega CR &= \frac{0,194}{p}. \end{aligned}$$

Cherchons maintenant la valeur du terme fondamental  $e_1$  ; admettons pour  $E_1$  une valeur efficace de 15 volts, ce qui conduit sur l'écran à des amplitudes de  $\pm 15\sqrt{2} = \pm 21$  mm.

On aura alors

$$e_1 = \frac{E_1}{\omega CR} = \frac{15}{\omega CR} = \frac{15p}{0,194}.$$

On devra donc adopter, pour la tension étudiée, une valeur d'autant plus grande qu'on se propose d'obtenir sans erreur appréciable des harmoniques plus élevés. En se bornant à  $p=9$ , on trouve

$$e_1 = 700 \text{ volts environ.}$$

Examinons maintenant la déformation due au courant de fuite entre plaques déviateurs : pour qu'elle soit négligeable, il faut que ce courant soit petit devant le courant circulant dans la résistance  $R$  ; cette condition sera remplie en prenant pour le courant dû au terme fondamental

$$I_1 = 0,5 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$\text{Or } RI_1 = 15 \text{ V}$$

$$\text{d'où } R = 30\,000 \text{ ohms.}$$

Calculons maintenant la valeur de la capacité ; en supposant  $\omega=314$

$$C = \frac{0,194}{p\omega R} = \frac{0,194}{9 \times 314 \times 30\,000} = 2,3 \times 10^{-3} \mu \text{ F.}$$

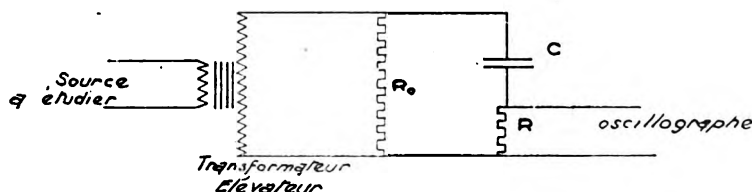


FIG. 13. — Etude d'une tension systématiquement déformée.

On voit donc qu'on peut étudier très facilement une tension alternative de fréquence industrielle en la déformant systématiquement à l'aide d'appareils très peu coûteux.

Dans l'application pratique de cette méthode, on devra toutefois s'assurer que l'introduction du circuit déformant, combiné avec les inductances que peut renfermer le circuit d'alimentation ne peut conduire à des résonances. En particulier, si la tension relativement élevée de 700 V nécessaire à l'étude doit être obtenue avec transformateur élévateur, on chargera celui-ci à l'aide d'une résistance  $R_0$ , comme le montre la fig. 13.

La fig. 14 montre une photographie obtenue avec le montage précédent sur un secteur à 50 périodes par seconde. On remarque particulièrement la présence de l'harmonique 5 et de quelques autres de fréquence très élevée.



II. *L'appareil peut supporter des surcharges considérables, entraînant le spot bien au-delà des limites de l'écran, sans aucun dommage ; ceci permet l'étude de courbes périodiques qui seraient impossibles à étudier avec les oscillographes mécaniques.*

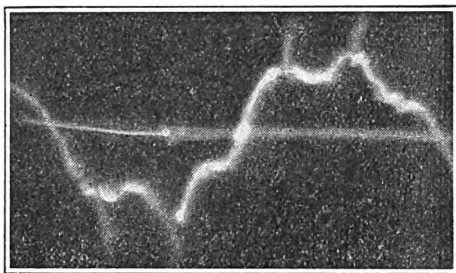


FIG. 14. — Tension d'un secteur de fréquence 50 systématiquement déformée.

Prenons par exemple le cas d'une tension ayant une courbe très dissymétrique par rapport à l'axe des temps, les elongations étant très grandes d'un côté de cet axe, et très faibles de l'autre côté ; on ne pourrait pas obtenir à grande échelle les faibles elongations avec un

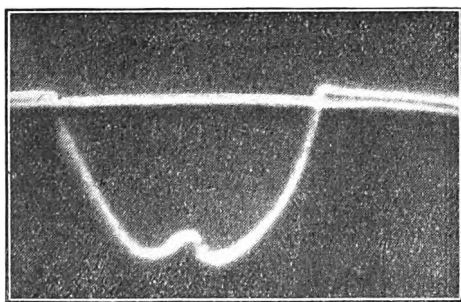


FIG. 15. — Tension anode-cathode d'un redresseur triphasé : ensemble de la courbe.

oscillographe mécanique, l'équipage devant être prévu pour supporter les grandes elongations, et ayant par conséquent une sensibilité réduite. Au contraire, rien n'est plus facile avec l'oscillographe cathodique, où les plaques peuvent supporter sans danger des tensions inverses de 300 V.

Nous avons pu ainsi étudier très facilement les tensions d'amorçage et chutes de tension dans l'arc des redresseurs à vapeur de mercure pour les tensions usuelles. Les fig. 15 et 16 montrent des photographies de la tension entre anode et cathode d'un redresseur triphasé : la fig. 15 montre l'ensemble de la courbe à échelle réduite, la fig. 16 montre

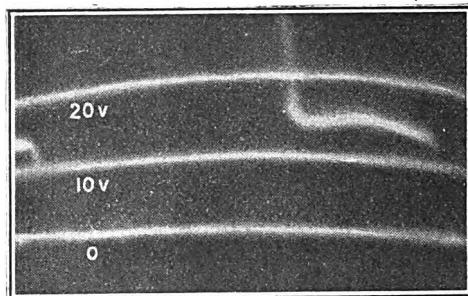


FIG. 16. — Tension anode-cathode d'un redresseur triphasé ; partie positive de la courbe.

la partie positive seule à grande échelle, avec des lignes de repères correspondant à 10 V et 20 V.

Dans le cas de disproportions énormes entre les deux déviations (cas de redresseurs à très haute tension par exemple) on peut éviter les risques d'amorçage entre plaques, à cause du faible débit de

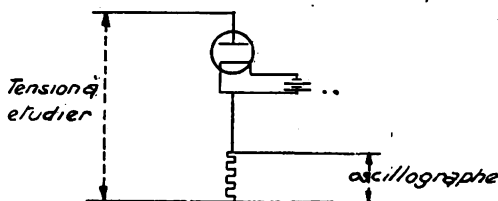


FIG. 17. — Etude d'une courbe de tension très fortement dissymétrique.

celles-ci, en séparant la partie positive de la partie négative à l'aide d'un redresseur auxiliaire, constitué par un kénotron, en s'arrangeant pour que la chute de tension interne de celui-ci soit négligeable (fig. 17).

Nous avons pu étudier ainsi la chute de tension interne de redresseurs à mercure fonctionnant avec des tensions inverses maxima de 3 000 V et même davantage.

III. — *Le fonctionnement de l'appareil est pratiquement indépendant de la fréquence étudiée, jusqu'à 250 000 périodes par seconde.* — Toutes les déformations dues à la période propre et à l'amortissement des équipages sont radicalement évités.

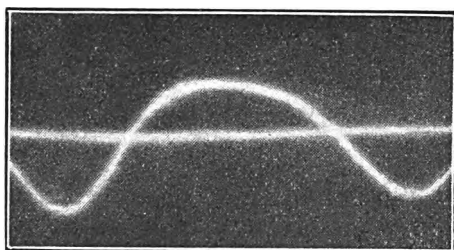


FIG. 18. — Tension de fréquence 8 000 (fréquence du balayage 4 000).

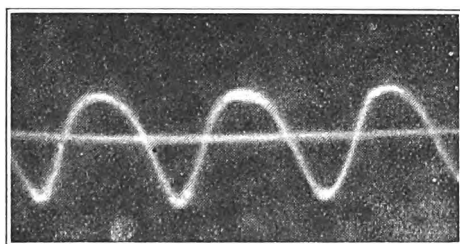


FIG. 19. — Tension de fréquence 8 000 (fréquence du balayage 2 000).

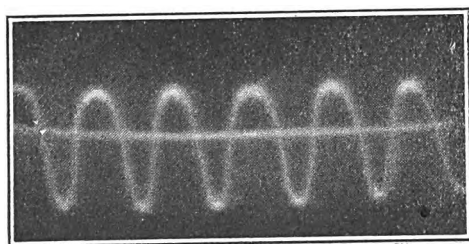


FIG. 20. — Tension de fréquence 8 000 (fréquence du balayage 1 000).

Nous donnons ci-dessus quelques photographies obtenues à diverses fréquences.

Les fig. 18, 19 et 20 ont été obtenues avec un hétérodyne musical ; fournissant une tension de fréquence 8 000 ; elles correspondent à

3 réglages différents de l'oscillateur de balayage, correspondant aux fréquences 4 000, 2 000 et 1 000. On peut juger sur le balayage à fréquence 1 000 de la proportionnalité au temps du développement.

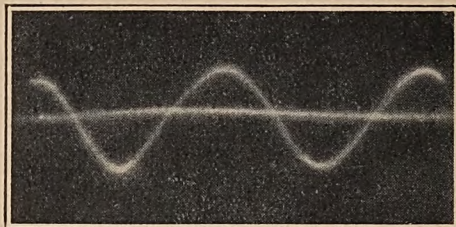


FIG. 21. — Hétérodyne à la fréquence 100 000.  
Couplage lâche.

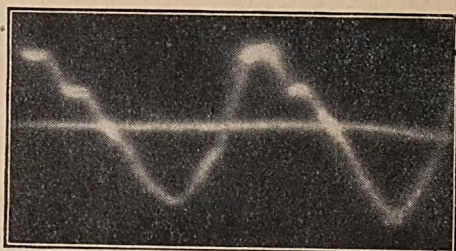


FIG. 22. — Hétérodyne à la fréquence 100 000.  
Couplage serré.

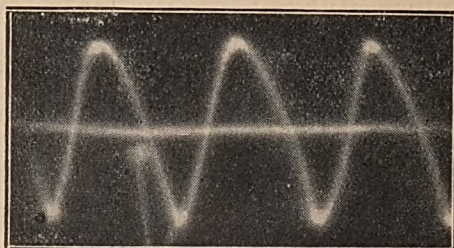


FIG. 23. — Hétérodyne à la fréquence 240 000.  
Couplage lâche.

Les fig. 21 et 22 ont été obtenues sur un hétérodyne fonctionnant à la fréquence 100 000 (longueur d'onde 3 000 m) ; la première correspond à un couplage lâche des circuits de grille et de plaque, la seconde à un couplage serré.

Enfin, la fig. 23 montre un cliché analogue obtenu à la fréquence 240 000 (longueur d'onde 1 250 m), avec un couplage lâche entre grille et plaque.

On voit la souplesse considérable de l'appareil, qui permet en particulier dans le domaine des fréquences audibles, les applications suivantes :

1° Etude des transformateurs et amplificateurs à fréquence audible ;

2° Etude des microphones, et des sons ;

3° Contrôle direct de la modulation d'un poste émetteur de T.S.F. de la manière suivante : on module par une tension à fréquence audible obtenue à l'aide d'un hétérodyne musical, et qu'on peut observer à l'oscillographe, on couple ensuite un circuit oscillant accordé sur l'antenne, et on envoie la tension prise sur ce circuit sur les plaques déviatrices. On synchronise alors le développement sur la fréquence de modulation ; on voit alors apparaître sur l'écran l'enveloppe de l'onde modulée, sous sa forme véritable.

Ce procédé donne d'excellents résultats, et a été adopté par la Société Française Radio-Electrique ;

4° Contrôle de la tension à la sortie d'un poste récepteur de T.S.F. et comparaison directe avec la modulation du poste émetteur.

Dans le domaine des fréquences supérieures aux fréquences audibles, l'appareil permet l'étude de celles correspondant aux grandes ondes de T.S.F. ; on peut l'appliquer ainsi à l'étude des circuits à moyenne fréquence des appareils récepteurs.

IV. — *La stabilité de l'oscillateur de balayage est très grande* : elle est telle que l'on peut parfaitement enregistrer sur un même cliché plusieurs courbes de tension relatives à un même circuit en passant de l'une à l'autre par un commutateur ; on peut ainsi observer les déphasages. Nous donnons à titre d'exemple le cliché de la fig. 24 relatif à un redresseur à oxyde de cuivre monté en pont de Wheatstone et débitant sur résistance : la courbe I est la tension alternative, la courbe III celle aux bornes d'une branche du pont, et la courbe II la tension redressée.

On voit donc que l'appareil est susceptible d'applications multiples à l'étude des phénomènes périodiques ; nous allons maintenant examiner son application à l'étude de certains régimes transitoires.

## APPLICATION A L'ÉTUDE DES RÉGIMES TRANSITOIRES

On doit distinguer deux classes de régimes transitoires :

1° Ceux qui ne peuvent se produire qu'une fois, ou se répéter difficilement : leur examen à l'aide de notre appareil est très difficile, à moins que leur durée soit suffisante pour que l'œil ait le temps de percevoir le déplacement du spot sur l'écran : on ne peut ainsi songer à calquer ou photographier la courbe, mais on peut néanmoins acquérir une idée du phénomène étudié.

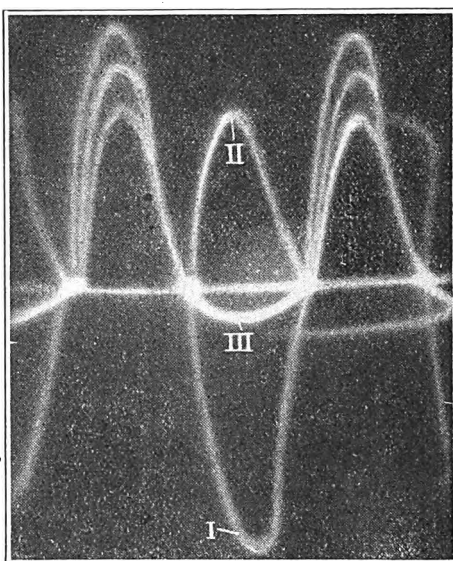


FIG. 24. — Tensions relevées sur un redresseur « Rectox » à oxyde de cuivre.

2° Les régimes transitoires que l'on peut répéter périodiquement : en ce qui concerne ces régimes, il suffit de synchroniser l'oscillateur de balayage sur leur fréquence de production pour pouvoir observer leur courbe représentative directement à l'état d'immobilité sur l'écran de l'oscillographe. On est en somme ramené à l'étude d'un phénomène périodique.

Nous allons maintenant étudier quelques procédés de répétition périodique de régimes transitoires : il n'existe malheureusement pas de dispositif susceptible d'un emploi général ; on devra dans chaque cas particulier choisir celui qui s'y appliquera le mieux.



On peut quelquefois employer des dispositifs mécaniques, mais il est très difficile d'obtenir ainsi une périodicité suffisamment parfaite pour effectuer l'enregistrement photographique.

Il existe heureusement d'autres dispositifs ; nous allons montrer en particulier comment on peut étudier les oscillations libres des circuits électriques, en utilisant des éclateurs disciplinés tels que les tubes à effluves du genre décrit plus haut, ou les relais à arc.

La fig. 25 montre un schéma général applicable à cette étude, une source 3 charge à travers une impédance 2 un condensateur 1, qui peut se décharger brusquement à travers l'éclateur 4. En dérivation aux bornes de ce condensateur est connecté le circuit électrique, dont

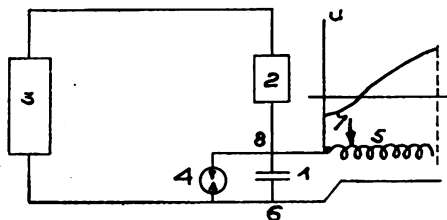


FIG. 25. — Schéma de principe applicable à l'étude des régimes libres.

on veut étudier le régime libre ; la répétition périodique de la décharge peut être obtenue de diverses manières.

1° Soit par l'emploi d'un éclateur 4 ayant une tension d'amorçage  $u_a$  et une tension de désamorçage  $u_d$  ; c'est en particulier le cas de notre tube à argon ; si la source 3 est à courant continu, et l'impédance 2 constituée par l'espace filament plaque d'une diode saturée. on aura notre oscillateur de balayage ; dans ce cas, la synchronisation peut s'effectuer, comme nous l'avons vu plus haut, par l'insertion d'une force électromotrice périodique dans le circuit de décharge.

2° Soit par l'emploi pour cet éclateur d'un relais à arc, pourvu d'une électrode de contrôle sur laquelle on peut appliquer la tension de synchronisation ; on peut alors faire usage d'une source 3 donnant une tension périodique synchronisée sur celle-ci.

La répétition périodique des décharges étant obtenue, il suffit de synchroniser le balayage sur sa fréquence, et d'envoyer sur les plaques P, une tension quelconque prise sur le circuit 5 pour pouvoir étudier le régime variable de celui-ci.

Nous allons examiner tout d'abord la nature de ce régime variable : il commence avec le début de la décharge dans l'éclateur 4, et subsiste après la cessation de celle-ci ; il devient alors un régime libre, la distribution initiale des potentiels étant celle de la fin de la décharge. Ce régime libre se superpose à celui de charge à travers l'impédance 2, qui doit être assez lent pour ne pas le perturber.

Supposons d'abord que la capacité 1 utilisée soit grande devant les capacités réparties du circuit 5 : dans ce cas, l'impédance du condensateur 1 pour les fréquences propres étudiées est faible et aucune oscillation ne se produit entre ses bornes ; si le circuit 5 est constitué par une ligne ou un enroulement à constantes réparties, on observera un régime libre constitué par la superposition de diverses ondes stationnaires, le circuit oscillant en quart d'onde pour l'onde fondamentale, avec un nœud de tension au point 8 ; les autres harmoniques ont des amplitudes relatives dépendant de la distribution initiale des potentiels, et présentent également un nœud de tension au point 8.

Si nous supposons maintenant la capacité 1 assez faible pour présenter une impédance notable aux fréquences étudiées : on observera alors une onde fondamentale stationnaire comprise entre le  $1/4$  d'onde et la  $1/2$  onde, la distribution des potentiels à un instant donné étant représentée sur la fig. 25. On observe alors en réalité les oscillations libres de l'ensemble du circuit 5 et du condensateur 1 ; on doit ensuite déduire les constantes du circuit 5 de celles de l'ensemble.

On peut enfin remarquer qu'on peut réduire la capacité 1 à celle du circuit étudié ; dans ce cas, on observera directement les oscillations de celui-ci, dont une extrémité est fermée sur l'impédance 2.

La méthode générale basée sur l'emploi du schéma de la fig. 10. constituant l'oscillateur d'excitation des régimes libres pourra être appliquée sous diverses conditions :

1° La fréquence de l'oscillateur d'excitation doit être petite devant la fréquence étudiée ; afin que le régime libre ait le temps de s'amortir entre deux excitations successives.

2° La fréquence choisie pour l'oscillateur de balayage doit permettre l'observation du régime libre tout entier, tout en étant synchronisée sur une fréquence multiple de la fréquence d'excitation ou égale à celle-ci.

En application des principes précédents, nous donnerons un montage pratique permettant l'étude des oscillations libres des enroule-



ments de transformateurs, et utilisant comme éclateur d'excitation un tube à argon semblable à celui de l'oscillateur de balayage décrit plus haut. Le montage est représenté par la fig. 26. On reconnaît sur celle-ci, avec les mêmes notations que sur la fig. 8, les organes de l'oscillographe et de son oscillateur de balayage. A cet ensemble vient s'adjoindre l'oscillateur d'excitation, utilisant les mêmes sources que l'oscillateur de balayage, et constitué par une diode 21, un condensateur

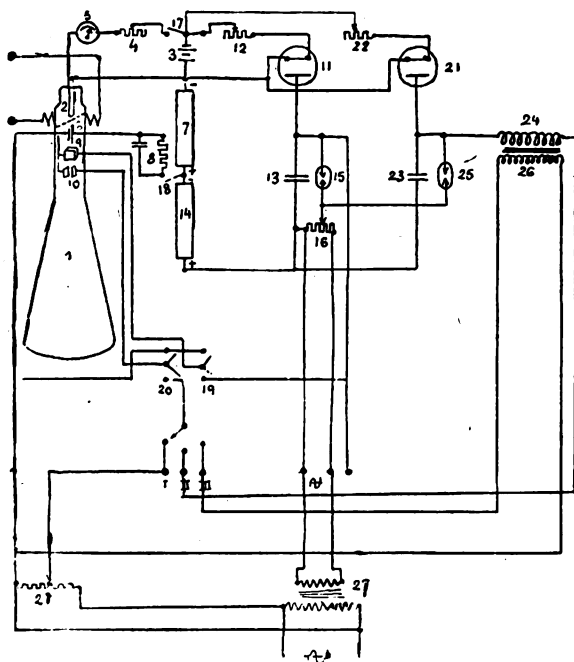


FIG. 26. — Schéma pratique pour l'étude des fréquences propres de transformateurs.

23, et un tube à argon 25. La synchronisation des deux oscillateurs sur une même fréquence, fournie par le transformateur d'isolement 27, se fait par l'unique potentiomètre 16. Le transformateur étudié a ses enroulements figurés en 24 et 26. Les deux oscillateurs étant synchronisés, l'un et l'autre, sur des sous-multiples convenables de la fréquence excitatrice, on peut, par manœuvre du commutateur de l'oscillographe, faire apparaître successivement sur l'écran, et enregistrer les courbes suivantes :

I. Courbe de tension, à la fréquence de repère.

II. Tension à l'extrémité de l'enroulement 24 : cette tension est la superposition de plusieurs autres :

- a) la tension aux bornes du condensateur 24, c'est une tension en dents de scie, de forme semblable à la tension de balayage ;
- b) la tension de régime variable de l'enroulement 24 ( $1/4$  d'onde) ;
- c) la tension induite dans celui-ci par le régime variable de l'enroulement 26 ( $1/4$  d'onde).

Il est facile de voir que la composition de cette tension résultante avec la tension de balayage, supposée synchronisée sur un multiple de la fréquence d'excitation est l'apparition sur l'écran de la courbe de tension de régime variable des enroulements, mais en coordonnées obliques, l'angle des axes étant de  $45^\circ$  si les 2 fréquences sont égales, et supérieur à  $45^\circ$  si la fréquence de balayage est multiple de la fréquence d'excitation.

III. Tension aux bornes de l'enroulement 26 : elle est la résultante de 2 autres :

- a) la tension de régime variable de l'enroulement 26 ( $1/4$  d'onde) ,
- b) la tension induite dans celui-ci par le régime variable de l'enroulement 24 (également  $1/4$  d'onde).

On observera alors sur l'écran la courbe de tension en coordonnées rectangulaires.

Le montage précédent peut permettre de nombreuses variantes : on peut, par exemple, laisser libres les 2 extrémités de l'enroulement 26, et observer ainsi les oscillations  $1/2$  onde de cet enroulement, superposées à des oscillations  $1/4$  d'onde de 24 ; on ne pourra utiliser alors que la position II du commutateur, qui donnera des coordonnées obliques. Pour éliminer celles-ci, il serait nécessaire d'utiliser des sources séparées pour les deux oscillateurs.

Dans le cas où l'impédance du condensateur d'oscillation est négligeable pour les fréquences étudiées, on peut utiliser un seul oscillateur pour l'excitation et le balayage.

C'est ainsi qu'ont été obtenues les photographies des fig. 27 et 28 relatives à un transformateur d'amplificateur de rapport  $1/5$  : l'enroulement à grand nombre de spires était l'enroulement 24.

La fig. 27 représente l'oscillation propre de cet enroulement, observée par induction sur l'enroulement 26. La fréquence mesurée est d'environ 4 000.

Si on augmente la fréquence de balayage et d'oscillation, on voit apparaître, superposées à la première période d'oscillation de l'en-

roulement 24, les oscillations propres de l'enroulement 26, dont la fréquence est d'environ 80 000 ; c'est ce que représente la fig. 28.

Une méthode analogue serait applicable à l'étude des oscillations libres des lignes ou câbles, en remplaçant au besoin l'éclateur à argon de l'oscillateur d'excitation par un relais à arc, et en faisant agir la tension de synchronisation sur l'électrode de contrôle de celui-ci.

Nous donnerons enfin un exemple d'étude d'oscillations libres répé-

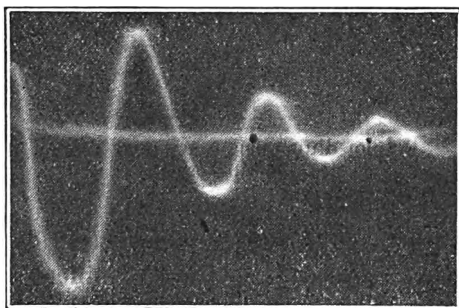


FIG. 27. — Oscillations libres du secondaire d'un transformateur téléphonique ( $f = 4\,000$ ).

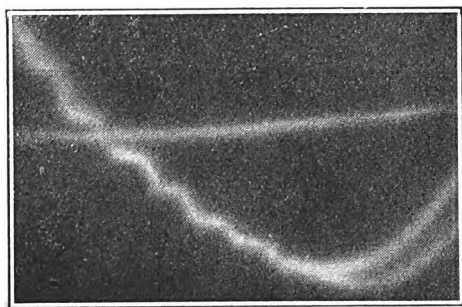


FIG. 28. — Oscillations libres du primaire d'un transformateur téléphonique ( $f = 80\,000$ ).

tées périodiquement au moyen d'un relais à arc, et la source d'alimentation étant alternative : il s'agit du régime variable d'un circuit inductance-capacité ; le schéma utilisé est représenté par la fig. 29. La capacité  $C$  est chargée par le secondaire  $S$  d'un transformateur dont le primaire  $P$  est alimenté par une source de tension alternative ; on ferme périodiquement le circuit du relais à arc  $A$  à l'aide de l'électrode de contrôle  $G$ , commandée synchroniquement à la tension alternative.

L'oscillateur de balayage étant synchronisé à la même fréquence, il suffit d'observer sur l'écran la tension désirée ; la fig. 30 montre

un cliché obtenu pour la tension aux bornes du condensateur, avec  $L=0,136$  H,  $C=0,5 \mu$  F, la fréquence d'alimentation étant 50.

Les méthodes décrites ci-dessus pour l'étude des régimes transitoires n'ont pas la prétention d'être générales: on voit toutefois qu'elles permettent d'explorer à l'aide de notre appareil un champ assez vaste.

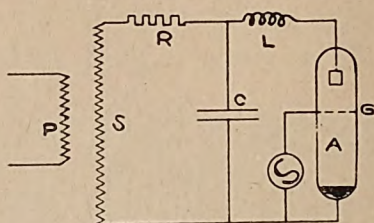


Fig. 29. — Emploi d'un relais à arc pour l'étude du régime d'un circuit oscillant.

celui des régimes libres de circuits ou ensemble de circuits quelconques, transformateurs, lignes ou même amplificateurs, qui n'ont pu être étudiés jusqu'ici qu'avec des appareils beaucoup plus coûteux, et d'un maniement moins aisé.

CONCLUSION : Dans la présente communication, nous avons présenté un oscillographe à rayons cathodiques, d'un maniement très simple.

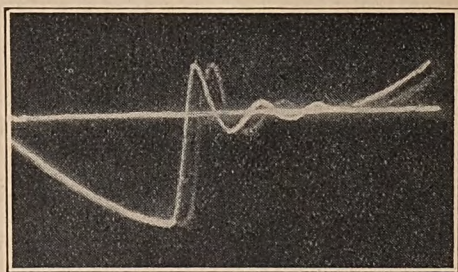


Fig. 30. — Oscillations libres d'un circuit oscillant ( $f = 630$ ).

et d'un transport facile ; nous avons montré comment cet appareil permet l'étude des phénomènes électriques périodiques, et d'un grand nombre de phénomènes de régime variable. Nous espérons que cet instrument, venant s'ajouter à ceux dont on dispose jusqu'ici, viendra les compléter heureusement et permettra des investigations nombreuses aussi bien dans le domaine de l'électrotechnique générale que dans ceux de la téléphonie et de l'étude des circuits à haute fréquence.

# LES MÉTHODES MODERNES DE NICKELAGE <sup>(1)</sup>

par Marcel BALLAY

Chef du service des recherches au Centre d'Information du Nickel.

---

## SOMMAIRE

*Généralités. — Préparation des pièces à nickeler. — Procédés généraux de nickelage. — Manutention des pièces et organisation des ateliers. — Les anodes de nickel. — Nickelage de l'acier. — Nickelage des alliages de cuivre. — Nickelage du zinc. — Nickelage de l'aluminium. — Méthodes d'essais des couches nickelées et résultats donnés par les méthodes modernes. — Conclusion.*

Au cours de ces trois dernières années, l'industrie française du nickelage a été l'objet d'une évolution rapide qui a profondément transformé sa technique. Le début de la phase active de cette évolution peut être situé, en toute certitude, à la « Semaine du Nickel » qui s'est tenue en octobre 1927 au Conservatoire National des Arts-et-Métiers. Depuis cette époque, les tendances se sont précisées et il nous a semblé intéressant de « faire le point » en soulignant les progrès réalisés et en montrant que notre pays vient en tête dans cette branche, particulièrement pour la vitesse de nickelage. En effet, si, il y a quelques années encore, la densité de courant utilisée pour le nickelage était souvent inférieure à 1/2 A par décimètre carré, plusieurs usines françaises, et non des moindres, travaillent régulièrement aujourd'hui à 10 A par décimètre carré. Nous nous proposons de décrire les méthodes employées actuellement pour le nickelage en particulier dans les ateliers travaillant en série suivant les principes modernes.

Les dépôts électrolytiques de nickel sont obtenus à partir de solutions aqueuses presque neutres de sels de nickel ou de dissolutions fortement ammoniacales d'oxyde de ce métal. La deuxième méthode est employée en analyse, mais l'industrie n'utilise que la première.

Avant d'examiner en détail la technique des méthodes actuelles de nickelage, il est utile de jeter un coup d'œil sur la série des tensions de polarisation électrolytique des métaux et de noter la place qu'y

---

(1) Communication présentée à la séance du 18 janvier 1930 de la 3<sup>e</sup> Section de la Société.

occupe le nickel. Nous avons reproduit, ci-après, la liste des tensions des principaux métaux industriels en prenant l'hydrogène comme référence et en affectant du signe + les tensions des métaux les plus électropositifs (fig. 1).

Dans ce tableau, le nickel est placé à gauche de l'hydrogène. On peut donc en déduire que par électrolyse d'une solution aqueuse contenant des ions  $H^+$  en grande quantité, l'hydrogène sera libéré à la cathode avant le nickel. On pourrait même craindre que le dépôt de nickel fût impossible, ou du moins, ne s'effectuât qu'avec un faible rendement. En fait, les valeurs portées dans le tableau ont trait à des solutions normales en ions et au dépôt sur platine. La surtension de l'hydrogène dégagé sur nickel est de 0,21 V, ce qui diminue l'écart entre le nickel et l'hydrogène : d'autre part, il est possible d'électro-

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,27 | 0,76 | 0,43 | 0,40 | 0,23 | 0,14 | 0,13 | +    |
| At   | Zn   | Fe   | Cd   | Ni   | Sn   | Pb   |      |
|      |      |      |      |      |      |      | H    |
|      |      |      |      |      |      |      | Sb   |
|      |      |      |      |      |      |      | Cu   |
|      |      |      |      |      |      |      | Ag   |
|      |      |      |      |      |      |      | Pt   |
|      |      |      |      |      |      |      | Au   |
|      |      |      |      |      |      |      | -    |
|      |      |      |      |      |      |      | 0,18 |
|      |      |      |      |      |      |      | 0,34 |
|      |      |      |      |      |      |      | 0,80 |
|      |      |      |      |      |      |      | 0,86 |
|      |      |      |      |      |      |      | 1,0  |

Fig. 1. — Liste des tensions des principaux métaux industriels.

lyser des solutions très peu acides à faible concentration en ions  $H^+$ . On est cependant amené à supposer que la concentration en ions hydrogène, c'est-à-dire le pH, joue un grand rôle dans le nickelage, ce que l'expérience vérifie.

Les métaux situés à gauche du nickel dans le tableau des tensions, c'est-à-dire plus électropositifs que lui, sont susceptibles de le déplacer de ses solutions : ces métaux plongés dans une solution d'un sel de nickel sont susceptibles de se recouvrir d'un dépôt plus ou moins adhérent, généralement peu adhérent, de nickel. Pratiquement, le fer, le cobalt et le cadmium, voisins du nickel, ne donnent pas de dépôts par déplacement dans les solutions de nickelage habituelles. Il n'en n'est pas de même pour le zinc, difficile à nickeler directement qui se recouvre dans les solutions de sels de nickel d'un dépôt noir de nickel pulvérulent. On pourrait craindre également des difficultés avec l'aluminium plus électropositif que le zinc ; or, l'aluminium peut être nickelé sans difficulté dans tous les bains de nickelage sans qu'il se

produise de dépôts par déplacement, par suite d'un état spécial de passivité, peut-être la formation d'une très mince pellicule d'alumine. La difficulté du nickelage de l'aluminium réside, non dans la production d'un dépôt de nickel par déplacement, mais dans la faible adhérence du métal électrolytiquement déposé si des précautions spéciales ne sont pas prises lors de préparation de la surface du métal à traiter.

Tous les métaux situés à droite du nickel dans la rangée des tensions se nickèlent sans difficulté.

#### PRÉPARATION DES PIÈCES A NICKELER

Si l'on excepte certains cas assez rares de traitement de fils ou de bandes les pièces à nickeler sont presque toujours polies avant le nickelage et arrivent à l'atelier d'électrolyse recouvertes d'une couche de matière grasse. Avant nickelage les pièces doivent être dégraissées et subir souvent une corrosion légère. Ces deux opérations que nous allons envisager successivement ne sont pas particulières au nickelage, mais concernent la technique des dépôts électrolytiques en général

*Dégraissage* : Pendant très longtemps le dégraissage a été effectué par passage dans un bain d'essence minérale qui dissout la plus grande partie des matières grasses, suivi d'un brossage avec de l'eau contenant de la chaux en suspension ; ce deuxième traitement élimine les dernières traces de graisse et donne des pièces que l'eau mouille bien. Le chaulage donne d'excellents résultats lorsqu'il est bien fait, mais présente l'inconvénient d'être très long, et partant, très onéreux. Le dégraissage à la chaux n'est plus guère employé actuellement que dans de vieux ateliers à faible production.

Le dégraissage préliminaire à l'essence minérale ou au benzol est très répandu ; tel qu'il est pratiqué ordinairement, il présente de nombreux inconvénients : main-d'œuvre importante pour le brossage, dangers d'incendie, etc. On a cherché à utiliser des dissolvants non inflammables (Trichlorure, d'éthylène  $C^2HCl^3$  ou « Tri », Nétoline) permettant de travailler à chaud et de supprimer la main-d'œuvre de brossage. Il est aussi nécessaire de prévoir un dispositif pour la récupération du solvant par distillation. Ces appareils de divers types comprennent en général un panier ou un tambour dans lequel sont déposées les pièces à traiter ; le panier ou tambour est placé dans une cuve



où se trouve le dégraissant chauffé à 60-70°C. Après quelque temps de séjour, les pièces sont sorties du récipient. La récupération du solvant peut être continue ou discontinue ; dans le premier cas, le dissolvant chargé de graisse s'écoule dans un appareil distillatoire et les vapeurs condensées retournent au récipient de dégraissage. Dans le second cas, la récupération s'effectue souvent dans l'appareil de dégraissage lui-même qui peut être rapidement transformé en alambic.

Les solutions alcalines chaudes, très employées autrefois pour le premier dégraissage, en remplacement des solvants organiques ne sont plus guère utilisées, sauf pour la préparation des pièces devant être nickelées au tonneau.

Le dégraissage à la ponce ou à la chaux a été remplacé presque partout par le dégraissage électrolytique. On utilise pour cela des solutions alcalines : carbonate de soude ou soude caustique, phosphate de soude, etc. Les pièces sont prises comme cathode et la densité de courant est relativement élevée 10 à 15 A : dm<sup>2</sup> ; il se produit à la surface des pièces un abondant dégagement d'hydrogène qui contribue à éliminer le film de matière grasse. Lorsqu'ils fonctionnent à froid, ces bains contiennent généralement du cyanure de potassium ou de sodium utile surtout pour le traitement des alliages de cuivre.

Voici une formule de bain de dégraissage électrolytique à froid :

Soude caustique : 12 kg.

Cyanure de sodium : 3 kg.

Eau : 100 l.

On ajoute quelquefois à ces bains du cyanure cuivreux et on obtient ainsi les bains de dégraissage-cuivrage. Le grand avantage de ces bains est de montrer que le dégraissage est terminé et uniforme ; il se forme en effet un dépôt de cuivre sur les pièces traitées. Toutefois, ce dépôt de cuivre est effectué dans des conditions très spéciales puisque le dégraissage a lieu sous une densité de courant de 10 A : dm<sup>2</sup> alors que la densité de courant admissible dans les bains de cuivrage alcalins froids est inférieure à 1 A : dm<sup>2</sup>. Il est donc bon de ne pas prolonger la durée du dégraissage cuivrage si l'on veut obtenir des dépôts ultérieurs très adhérents.

Les bains de dégraissage électrolytique donnent d'excellents résultats à chaud, particulièrement pour l'acier. On ajoute souvent une matière pulvérulente, alumine ou silice, qui parfait le dégraissage,



soit par abrasion, soit par adsorption. Voici une formule utilisée pour le dégraissage de l'acier.

Eau : 100 l.

Carbonate de soude cristallisé : 6 à 10 kg.

Alumine en poudre fine : 2 kg.

Ce bain est employé au voisinage de l'ébullition avec une densité de courant de 10 à 15 A:dm<sup>2</sup>. Il permet parfois de supprimer le dégraissage préalable aux solvants organiques.

*Corrosion* : Les dépôts électrolytiques obtenus sur des surfaces simplement dégraissées comme il vient d'être dit et rincées ne sont pas toujours très adhérents, surtout s'ils sont épais. Il a été reconnu qu'il y avait intérêt à faire précéder le nickelage d'une corrosion légère qui modifie la surface et augmente l'adhérence dans de fortes proportions. Cette pratique est très générale aux Etats-Unis et commence à se répandre en France ; il faut remarquer que dans certains cas, pour l'aluminium par exemple, il est impossible d'obtenir de dépôt adhérent, même mince, sans corrosion préalable. La nature du bain de corrosion dépend évidemment de la nature de l'objet traité.

Pour l'acier on utilise souvent une solution diluée d'acide chlorhydrique. La tendance moderne, du moins pour le nickelage très rapide, est dans la corrosion électrolytique par une solution d'acide sulfurique à 53° Baumé avec une densité de courant de 15 A:dm<sup>2</sup>, les pièces étant placées à l'anode ; la corrosion dure de 10 à 30 s. Dans des solutions plus diluées, l'attaque est trop énergique et grave fortement les pièces ; les solutions plus concentrées sont trop peu conductrices.

Pour les alliages de cuivre, on dégraisse presque toujours dans une solution alcaline cyanurée ; après rinçage, les pièces sont placées pendant quelques minutes dans une solution d'acide chlorhydrique à 10 pour 100. La méthode suivante nous a toujours donné d'excellents résultats, particulièrement pour les pièces devant être chromées après nickelage : après dégraissage électrolytique dans un bain alcalin cyanuré, on inverse le courant pendant 30 s. ; on rince, puis on passe pendant une minute dans une solution d'acide chlorhydrique à 10 pour 100.

Pour les alliages de zinc, les solutions d'acide chlorhydrique ou d'acide fluorhydrique au 1/10 conviennent bien.

Dans tous les cas, la corrosion doit être très légère, juste suffisante pour donner l'adhérence désirée ; si la corrosion est trop profonde, l'avivage ultérieur du dépôt est difficile et coûteux.

## NICKELAGE

Le constituant principal des bains de nickelage industriels est toujours le sulfate de nickel <sup>(1)</sup>  $\text{SO}_4\text{Ni}$ ,  $7\text{H}_2\text{O}$  auquel on ajoute divers produits qu'on peut répartir ainsi suivant leur rôle :

a) Sulfates alcalins, ammoniacaux ou magnésiens pour augmenter la conductibilité et diminuer la concentration en ions  $\text{Ni}^{++}$ .

b) Sels halogénés, généralement des chlorures, pour augmenter la corrosion des anodes en évitant la passivité : chlorure de sodium, d'ammonium, de magnésium ou de nickel. Les bromures agissent de la même manière que les chlorures, mais le rôle des fluorures paraît tout autre.

c) Régulateurs d'acidité jouant le rôle de tampons : acide borique, fluorure de sodium. De plus, l'acide borique possède la propriété de donner des dépôts plus blancs.

d) Produits organiques dont l'influence est encore loin d'être connue, mais que l'on peut répartir en deux groupes :

Des corps comme les citrates ou l'acide citrique qui semblent diminuer la concentration en ions  $\text{Ni}^{++}$  par la formation de complexes, d'où leur rôle dans le nickelage du zinc.

Des colloïdes comme la dextrine, la gomme adragante qui donnent des dépôts très brillants, mais fragiles, et ne paraissent intéressants que pour les dépôts minces <sup>(2)</sup>.

Ces différents groupes de produits sont rarement tous représentés dans les bains de nickelage courants ; les produits organiques sont souvent omis.

Pour augmenter la densité de courant, on tend à accroître la concentration en sel de nickel et la température de l'électrolyte.

---

(1) Le chlorure de nickel  $\text{NiCl}_2$ ,  $6\text{H}_2\text{O}$  pourrait être aussi utilisé pour fournir les ions  $\text{Ni}^{++}$ , mais il est beaucoup plus coûteux que le sulfate. Signalons aussi l'emploi de fluoroborates dans les solutions étudiées par M. Hollard, qui permettent l'obtention de dépôts très remarquablement souples, même à forte épaisseur.

(2) Il est possible que la fragilité des dépôts de nickel obtenus dans les bains contenant des colloïdes ait la même cause que dans le cuivrage étudié par MM. Marie et Jacquet et Mlle Claudel (C. R. 187, 1928, p. 41 et 170).

Un facteur très important de l'opération de nickelage est la concentration en ions  $H^+$  de la solution. Pendant longtemps on s'est contenté d'apprécier l'acidité à l'aide du papier de tournesol et du papier au rouge Congo, mais ces moyens se sont révélés insuffisants lorsqu'on a voulu augmenter l'épaisseur de dépôt, diminuer les rebuts et accroître la vitesse de nickelage. En général <sup>(1)</sup> les dépôts obtenus dans des solutions trop alcalines, de  $pH \geq 6,5$ , sont très fragiles peu adhérents et de couleur foncée ; dans les solutions trop acides de  $pH \leq 4,5$  les dépôts sont très brillants, mais aussi très fragiles. Le  $pH$  optimum dépend de la composition de l'électrolyte, de sa température et de la densité de courant, mais dans la plupart des cas de nickelage à faible et moyenne densité de courant, cet optimum est compris entre 5,4 et 6,3. Pour les bains de nickelage très rapide, la limite supérieure de  $pH$  est voisine de 5,7.

Le  $pH$  peut être mesuré par la méthode électrométrique ou à l'aide d'indicateurs colorés. Cette deuxième méthode est très pratique et des appareils extrêmement simples, spécialement étudiés pour la détermination de l'acidité des bains de nickelage ont été mis dans le commerce. Les appareils utilisés comprennent simplement un bloc de bois ou de métal noirci percé de 6 trous dans lesquels on place des tubes à essais contenant des solutions étalons de  $pH$  connu additionnées d'indicateur coloré. Le pourpre de bromocrésol qui permet de mesurer la gamme des  $pH$  de 5,3 à 7,2 convient dans la plupart des cas. On compare la couleur de ces solutions étalons, vues à travers un tube contenant l'électrolyte étudié, à la couleur de l'électrolyte additionné d'indicateur.

La fig. 2 représente un de ces appareils. La détermination du  $pH$  à l'aide de ces appareils demande quelques minutes et peut être faite par un ouvrier quelconque.

Les bains de nickelage actuellement utilisés peuvent se classer d'après la densité de courant cathodique possible, c'est-à-dire d'après la vitesse de travail, en trois catégories.

- a) Bains froids  $I < 1 \text{ A} : \text{dm}^2$ .
- b) Bains chauds agités ou non, pièces fixes ou mobiles  $1 < 5 \text{ A} : \text{dm}^2$ .
- c) Bains chauds agités, pièces fixes ou mobiles  $I = 8 \text{ à } 12 \text{ A} : \text{dm}^2$ .

---

(1) Voir M. R. Thompson The acidity of nickel depositing solutions. Trans. Amer. Electrochim. Soc. Vol. 41, p. 333. 1922.

Cette classification, quelque peu arbitraire comme toutes les classifications, correspond toutefois assez bien à des types d'installations différents.

a) Bains froids à faible densité de courant. Jusqu'en 1925, on n'utilisait guère en France que ce type de bains, constitué surtout de sulfate de nickel et de sulfate double de nickel et d'ammonium, avec, quelquefois, du sulfate de soude ou de magnésie, des chlorures pour

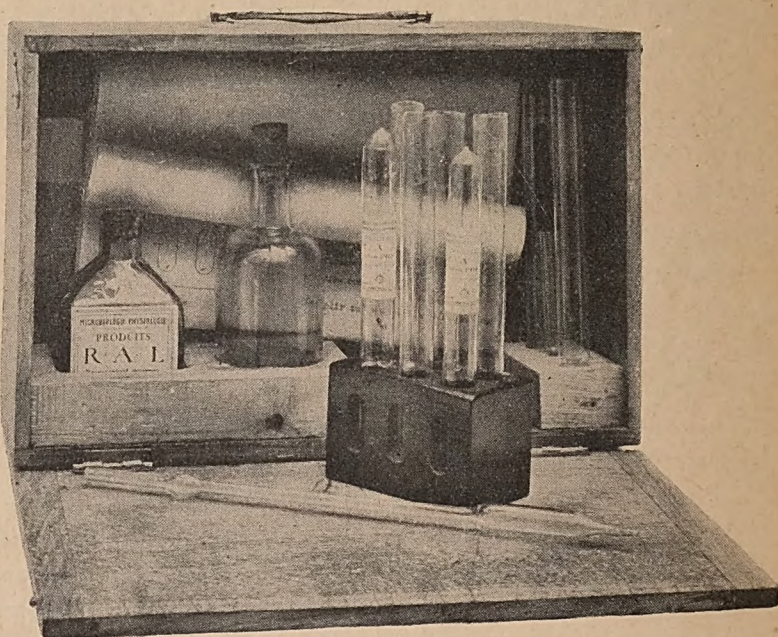


Fig. 2. — Nécessaire pour la détermination rapide du pH des bains de nickelage par la méthode colorimétrique.

faciliter la corrosion des anodes, etc. La densité de courant admissible dépasse rarement 0,5 A: dm<sup>2</sup>. Voici quelques compositions de tels bains.

|                                                                                        | I            | II     | III          |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------------|
| SO <sup>4</sup> Ni 7H <sup>2</sup> O .....                                             | 100 à 150 g. | 150 g. | 100 à 150 g. |
| SO <sup>4</sup> Ni, SO <sup>4</sup> A <sub>m</sub> <sup>2</sup> , 6H <sup>2</sup> O... | —            | 50 g.  | —            |
| NaCl.....                                                                              | 10 g.        | 10 g.  | 10 g.        |
| BO <sup>3</sup> H <sup>3</sup> .....                                                   | 15 g.        | 15 g.  | 15 g.        |
| SO <sup>4</sup> Na <sup>2</sup> .....                                                  | 0 à 100 g.   | —      | —            |
| SO <sup>4</sup> Mg, 7H <sup>2</sup> O.....                                             | —            | —      | 100 g        |
| Eau .....                                                                              | 1 l.         | 1 l.   | 1 l.         |

b) Bains chauds, 30 à 40°, fonctionnant à densité de courant moyenne atteignant parfois 5 A:dm<sup>2</sup>, sans agitation de l'électrolyte la plupart du temps. Ces bains sont très employés aux Etats-Unis où presque toujours les pièces à nickeler sont déplacées dans la cuve de nickelage par une chaîne. La concentration en nickel de l'électrolyte est plus grande que dans les bains froids ; voici une formule très employée permettant d'atteindre une densité de courant 3 à 4 A:dm<sup>2</sup> à la température de 40°C. (1).

SO<sup>4</sup>Ni 7H<sup>2</sup>O : 200 à 250 gr. par litre.

NiCl<sup>2</sup> 6H<sup>2</sup>O : 10 à 15 gr. par litre.

BO<sup>3</sup> H<sup>3</sup> : 20 à 30 gr.

c) Enfin, il y a un peu plus de deux ans, est apparu en France un nouveau type de bain de nickelage permettant de travailler à des densités de courant dépassant 10 A:dm<sup>2</sup>. Les procédés classiques permettant d'augmenter la densité de courant, c'est-à-dire l'agitation du bain, l'élévation de la température et l'accroissement de concentration du métal dans l'électrolyte n'ont pas permis, seuls, d'obtenir des résultats intéressants. Dans ces conditions, en effet, il se forme, à la surface des pièces, de petites bulles d'hydrogène, très adhérentes, au-dessous desquelles le métal ne se dépose plus ; les pièces traitées sont « piquées » et inutilisables. Heureusement, le remède est simple ; il suffit d'ajouter à l'électrolyte de très petites quantités d'un agent oxydant. Différents corps peuvent être utilisés dans ce but, permanganate de potasse, eau oxygénée, etc., mais le plus intéressant, très employé aujourd'hui, est l'acide nitrique que l'on introduit dans le bain, soit sous forme d'acide pur, soit à l'état de nitrate de nickel. L'agent oxydant ne doit pas être en excès, sous peine d'obtenir des dépôts fragiles ; un très grand excès d'agent oxydant diminue fortement le rendement cathodique comme le montre la courbe fig. 3.

Le pH peut varier entre des limites assez larges sans que le rendement cathodique varie beaucoup ; toutefois pour obtenir de bons dépôts épais adhérents et peu fragiles, il y a lieu de maintenir le pH entre 5,7 et 4,8. La figure 4 montre l'influence du pH sur le rendement cathodique de ces bains.

Les bains utilisés pour ces densités de courant sont toujours à forte concentration en nickel. Le Centre d'Information du Nickel, qui a spécialement étudié et répandu cette méthode de nickelage, préconise la composition suivante :



agitation. Il est utile de filtrer le bain fréquemment, ou de réaliser une filtration continue.

Pour une densité de courant de  $10 \text{ A} : \text{dm}^2$ , la température doit être comprise entre  $45$  et  $55^\circ\text{C}$  ; dans ces conditions un dépôt de  $0,025 \text{ mm}$  est obtenu en moins de quinze minutes.

Cette méthode de nickelage s'est rapidement répandue en France où elle a pris naissance ; elle permet d'obtenir très rapidement des dépôts épais, très peu fragiles et d'adhérence parfaite. Elle convient particulièrement bien pour le nickelage avant chromage.

#### MANUTENTION DES PIÈCES ET ORGANISATION DES ATELIERS

Les pièces à nickeler sont encore très souvent fixées à des crochets de laiton ou de cuivre par l'intermédiaire de fil métallique. Toutefois, ce mode d'attache tend à disparaître dans les ateliers travaillant en série, car il est long et coûteux à cause de la main-d'œuvre qu'il exige. La tendance moderne est dans l'emploi de montages, spécialement étudiés pour chaque genre de pièces, sur lesquels ces pièces sont immobilisées par des griffes amenant le courant ; ces montages se prêtent bien à une organisation rationnelle de travail.

Dans les bains fonctionnant à froid, à faible densité de courant, les pièces sont généralement immobiles. Pour éviter l'appauvrissement du bain autour des pièces et augmenter la densité de courant, les barres porte-cathodes sont quelquefois animées d'un mouvement de translation alternatif par excentrique.

Un perfectionnement a été apporté par l'emploi d'une chaîne sans fin tournant au-dessus des cuves et sur laquelle sont fixés les crochets supportant les pièces. Les pièces sont accrochées à la chaîne à une extrémité de la cuve, se déplacent dans le bain, puis sont décrochées à la même extrémité, la vitesse de déplacement étant calculée pour que la durée de séjour dans l'électrolyte soit suffisante ; la fig. 5 montre une cuve équipée avec un de ces appareils.

L'emploi de ces chaînes, très intéressant, ne résout cependant pas entièrement à lui seul le problème d'organisation de la manutention des pièces, car il ne concerne généralement que le dépôt électrolytique proprement dit et non la manutention des pièces pour le dégraisage, le rinçage, etc. Aussi, aux Etats-Unis, on est allé beaucoup plus loin : les pièces, après polissage, sont fixées à une chaîne qui les con-



duit dans les différents bains : dégraissage, corrosion, cuivrage, lavage, nickelage, etc. Des dispositifs ingénieux soulèvent les pièces et les font passer d'une cuve dans la suivante.

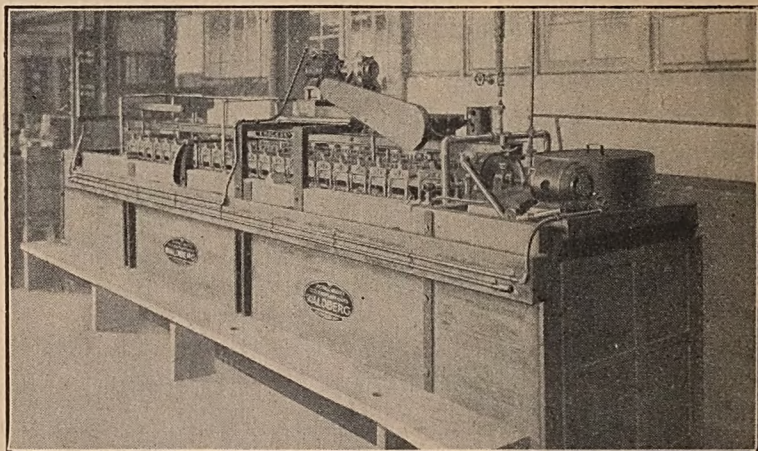


Fig. 5. — Cuve équipée avec des appareils Walberg.

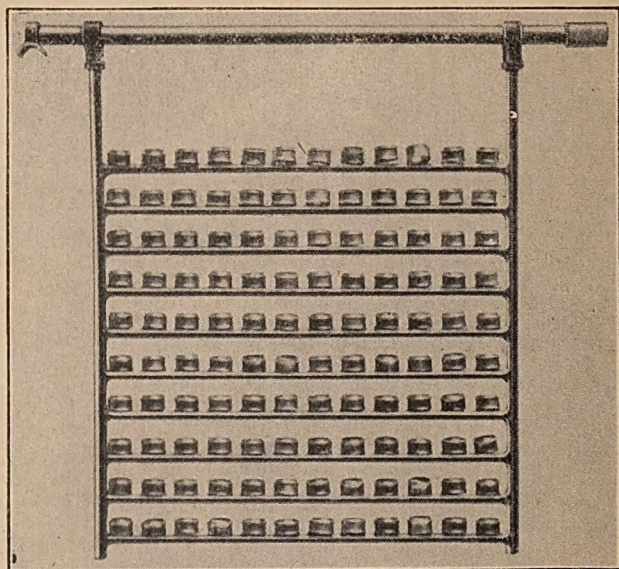


Fig. 6. — Montage sur lequel sont fixées 120 pièces.

Les chaînes, du type américain, très coûteuses, conviennent surtout aux très fortes productions ; en France, où l'échelle industrielle est plus modeste, on a cherché à résoudre le problème par la réalisation



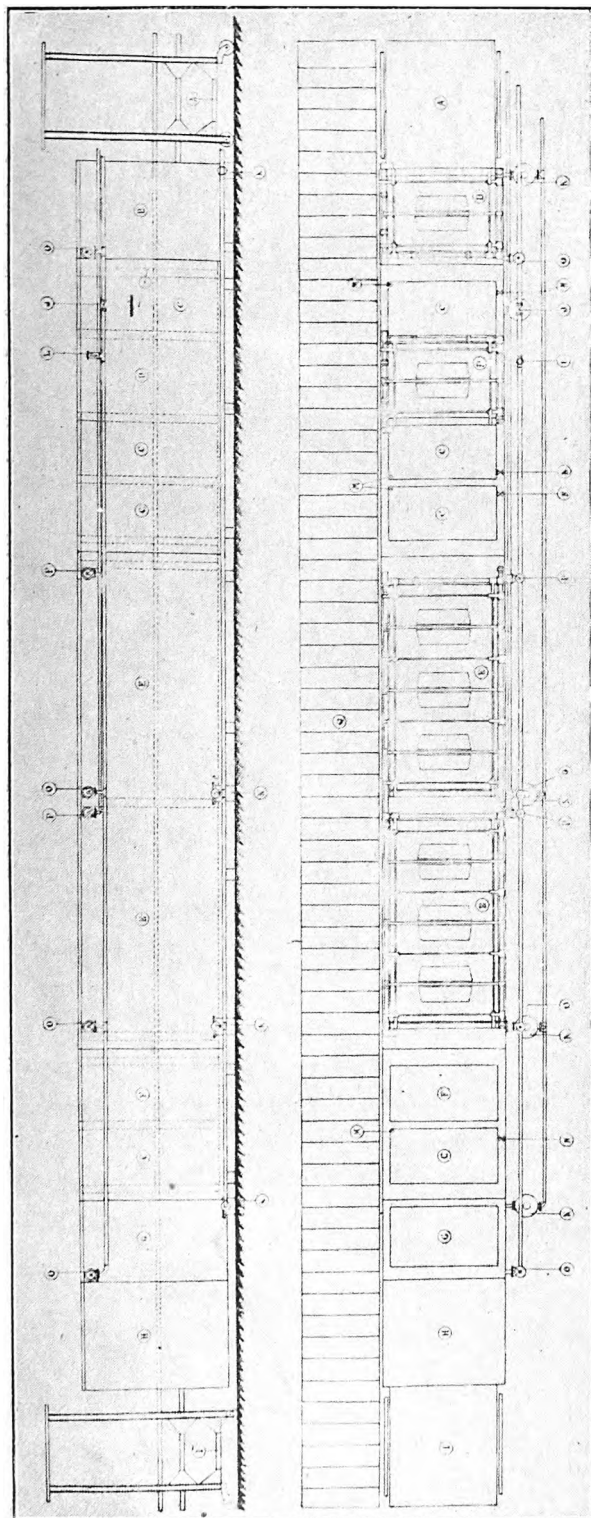


Fig. 7. — Dessin d'un atelier de nickelage à chaud très rapide 10 A.rdm<sup>2</sup>.

A Poste d'alimentation.  
 B Dégraissage Electrolytique à l'ébullition.  
 C Rincage en eau froide courante.  
 D Corrosion sulfurique sous courant.  
 E Cuves de nickelage.  
 F Rincage récupération des sels de nickel.  
 G Rincage en eau chaude.  
 H Séchage.  
 I Poste de détachage.

J Détendeur à vapeur.  
 K Purgeur.  
 L Soupape de sûreté.  
 M Trop plein vidange.  
 N Robinet d'arrivée d'eau froide.  
 O Robinet d'arrivée de vapeur.  
 P Robinet d'arrivée d'air comprimé.  
 Q Piste de travail.

de trains de cuves et l'emploi de montages. Dans cette conception, les cuves sont placées bout à bout, sans espace intermédiaire, et constituent un bloc dans lequel on rencontre successivement des compartiments permettant le dégraissage, la corrosion, le nickelage, les différents rinçages, etc. Les pièces placées sur les montages (fig. 6) après polissage et lavage à l'essence, s'il y a lieu, passent successivement dans les différents compartiments ; le passage d'un compartiment à l'autre se fait à la main ou à l'aide d'un palan. Ce mode de travail convient particulièrement bien aux méthodes modernes de nickelage à forte densité de courant ; les pièces séjournant peu de temps dans

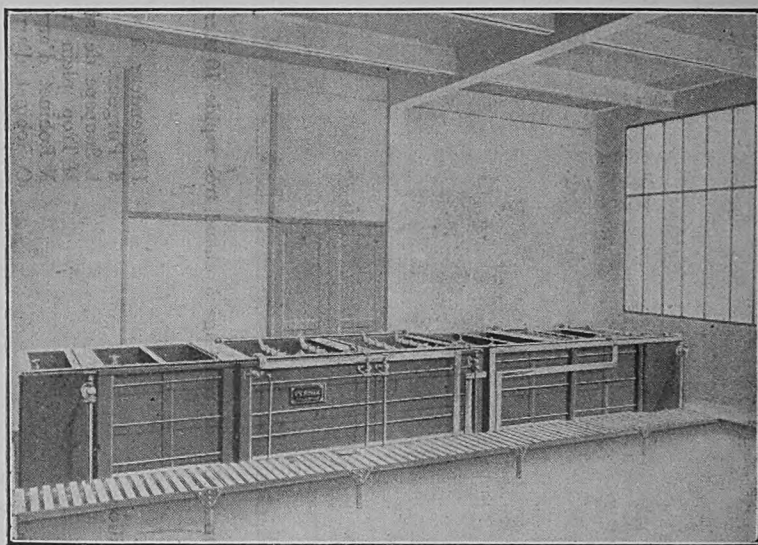


Fig. 8. — Atelier de nickelage travaillant à 10 A:dm<sup>2</sup>.

l'électrolyte, 15 minutes au maximum, le débit d'un train de cuves de dimensions restreintes est considérable. Durant ces deux dernières années, ce mode de travail rapide a été adopté par d'importantes usines françaises. La fig. 7 est un schéma d'une installation suivant cette conception. La fig. 8 est une vue photographique d'un atelier utilisant ces procédés.

#### LES ANODES DE NICKEL

Le nickel déposé pendant le nickelage provient en majeure partie des anodes ; il n'est donc pas inutile de s'arrêter un instant sur ce sujet qui préoccupe à juste titre beaucoup d'industriels.

Une anode parfaite devrait se dissoudre pendant le passage du courant avec un rendement de 100 pour 100 ; elle ne donnerait aucun résidu solide susceptible de polluer l'électrolyte. Une telle électrode n'existe pas et toutes les anodes que l'on trouve dans le commerce sont plus ou moins passives ; une partie se dissout, mais une portion se désagrège par la corrosion et tombe au fond du bac ou flotte dans l'électrolyte, vient se déposer à la surface des pièces et donne des dépôts rugueux. Le plus souvent, le phénomène est encore compliqué par la formation d'un enduit noirâtre spongieux composé de graphite et de silice en faible quantité, mais surtout d'un oxyde supérieur de nickel encore peu connu, de composition probablement voisine de  $\text{Ni}_2\text{O}_3$  ; on dit dans les ateliers que l'anode charbonne. Quelquefois, ce produit noirâtre se forme en abondance sous une mince couche de nickel non attaqué ; l'anode conserve en apparence sa forme primitive, puis la couche superficielle s'effondre entraînant des quantités importantes de matière noirâtre et de nickel non attaqué, tous deux perdus pour l'électrolyte.

On peut être tenté de chercher des remèdes à cet état de choses dans deux directions en agissant, soit sur la composition du bain, soit sur la composition des anodes.

Dans les bains ne contenant pas de chlorures, le « charbonnage » des anodes est rare, mais le rendement anodique est faible ; l'anode se dissout peu et le bain tend à devenir acide. Si l'on ajoute des ions  $\text{Cl}^+$ , le rendement anodique augmente rapidement. Hogaboom indique (1) que l'addition de 0,38 g de chlorure de nickel par litre fait passer le rendement anodique de 20,8 à 41,9. Le même auteur relate d'intéressantes expériences desquelles il semble résulter que, pour un type d'anode déterminé, le charbonnage disparaîtrait avec une teneur élevée en chlorure. Il est possible que l'aptitude à la formation d'oxyde noir passe par un maximum pour une certaine teneur en chlorure variable avec la composition de l'électrolyte.

Les recherches sur l'influence de la composition du bain sur la corrosion des anodes sont encore peu avancées et on a cherché surtout à agir sur la composition et la préparation des anodes.

Depuis peu de temps des anodes spéciales, dites dépolarisées, ont été mises sur le marché en France. Aux Etats-Unis, ces anodes ont

---

(1) Hogaboom The Metal Industry Vol. 27 n° 4 p. 174.

donné d'excellents résultats et ont remplacé presque entièrement les anciennes anodes à 95 à 97 pour 100 de nickel, coulées ou laminées. Elles sont fournies en barres laminées à section elliptique pesant environ 18 kg au mètre, avec une surface 19 dm<sup>2</sup> pour la même longueur. Ces anodes, dont la fabrication est protégée par des brevets, sont constituées de nickel très pur volontairement oxydé. L'oxygène présent sous forme d'oxyde de nickel insoluble à l'état solide serait la cause d'une hétérogénéité régularisant la corrosion sans introduire de matières étrangères dans l'électrolyte. La composition moyenne de ces anodes est la suivante :

Ni + Co = 99,75  
Cu = 0,033  
Si = 0,012  
Fe = 0,07  
S = 0,005  
C = 0,002  
Mn = traces  
O = 0,1 à 0,2

Ces anodes sont souvent livrées, surtout aux Etats-Unis, après un traitement destiné à éliminer les couches superficielles qui sont quelquefois passives et donnent lieu, pendant les premiers jours de marche, à une sorte d'exfoliation. Ce traitement consiste en une corrosion anodique dans une solution d'acide chlorhydrique à 35 pour 100. A notre avis, ce traitement n'est pas nécessaire, il suffit de brosser très énergiquement l'anode après quelques jours de fonctionnement ; après ce brossage, la corrosion est parfaitement régulière. Nous avons étudié ces anodes dans différents ateliers de nickelage et au laboratoire : elles se sont toujours beaucoup mieux comportées dans les bains contenant des chlorures que les meilleures nodes auxquelles elles étaient comparées, aussi bien dans les bains froids que dans les bains chauds à forte densité de courant. Elles sont beaucoup moins sujettes au charbonnage et se corrodent plus régulièrement.

Nous avons essayé au laboratoire les anodes dépolarisées comparativement aux meilleures anodes laminées que l'on trouve en France. Les anodes placées dans des bacs différents étaient montées en série ; la surface immergée correspondait à une densité de courant anodique de 0,6 A : dm<sup>2</sup>. Le bain utilisé avait la composition suivante :

SO<sup>4</sup>Ni, 7H<sup>2</sup>O : 100 g par litre.

$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  : 15 g par litre.

$\text{BO}^3 \text{H}^3$  : 10 g par litre.

Le pH était maintenu au voisinage de 5,9 par addition d'acide tous les matins. Dans ces conditions, les anodes dépolarisées ont beaucoup moins charbonné et se sont corrodées très régulièrement comme le montrent les figures 9 et 10.



Fig. 9.  
Anode laminée après fonctionnement ordinaire.

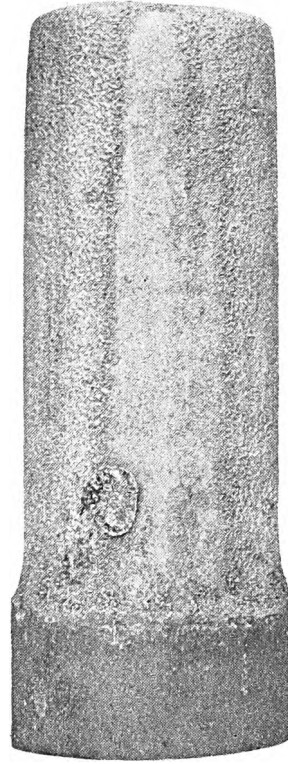


Fig. 10. — Anode dépolarisée après fonctionnement dans les mêmes conditions que l'anode de la fig. 9.

On utilise aussi, aux Etats-Unis, des empilages de disques plus ou moins épais et creux ; au centre de ces disques, passe une tige de plomb. Dans certains cas ces disques sont en nickel électrolytique. Ce montage a l'avantage d'utiliser plus complètement le nickel : on ajoute de temps en temps de nouveaux disques.

Pour les anodes dépolarisées, la suspension dans le bain est souvent faite, du moins aux Etats-Unis, à l'aide de crochets en métal Monel,

peu oxydable et de résistance mécanique élevée. Ce montage ne permet pas l'emploi total de l'anode, la partie supérieure devant rester hors du bain. En France, des montages spéciaux ont été étudiés pour permettre l'immersion complète de l'anode dépolarisée ; le crochet est recouvert par une matière isolante. Un tel montage est représenté fig. 11.

Dans les bains agités, si la filtration n'est pas continue, il est utile

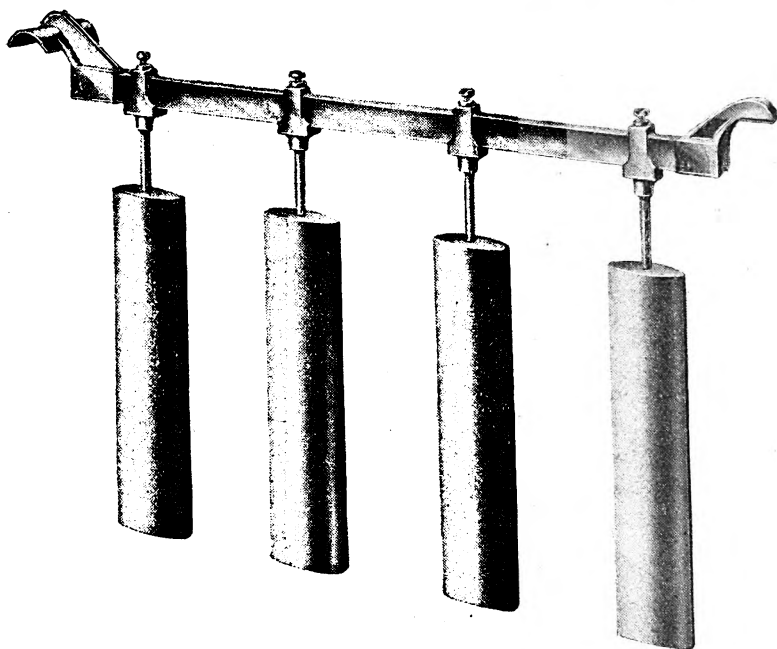


Fig. 11. — Montage d'anodes dépolarisées.

d'ensacher les anodes pour que les particules qui s'en détachent ne viennent pas se déposer à la surface des pièces et les rendre rugueuses.

#### NICKELAGE DE L'ACIER

Les dépôts électrolytiques étant toujours poreux sous de faibles épaisseurs, l'acier ne peut être protégé efficacement contre la formation de rouille que par un revêtement électrolytique d'épaisseur suffisante. L'expérience a montré qu'un dépôt de 25/1 000 de millimètre constituait une bonne protection ; un tel dépôt n'est pas absolument continu, mais ses cavités sont peu nombreuses et les rares taches de

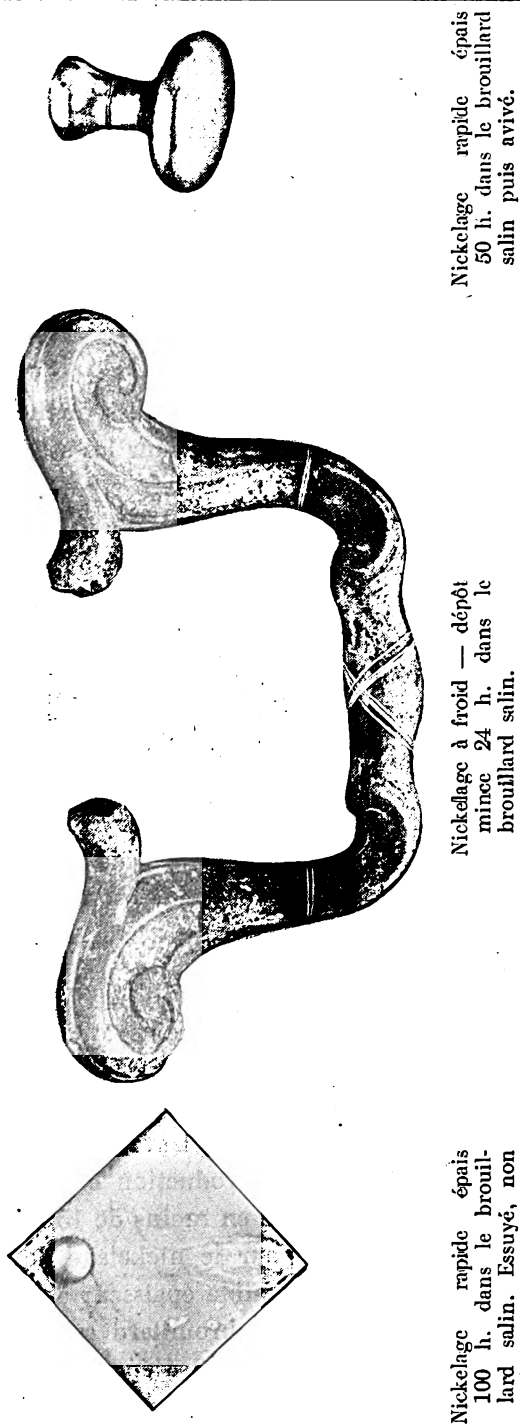


Fig. 12. — Pièces de fonte ayant séjourné dans le brouillard d'eau salée à 20 pour cent de NaCl.

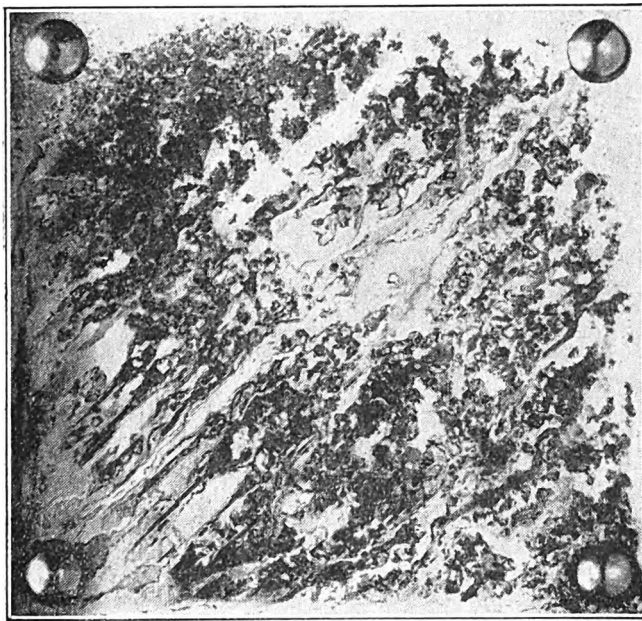
rouille qui se forment peuvent être facilement enlevées sans que l'apparence de la pièce en souffre.

Un dépôt de cette épaisseur peut être constitué de nickel seul ou d'une couche complexe de cuivre et de nickel. Ces deux procédés sont actuellement les seuls employés sur une grande échelle. Aux États-Unis, les couches complexes cuivre-nickel ou nickel-cuivre-nickel sont presque uniquement réalisées ; il faut remarquer que dans ce pays le nickelage très rapide, de création française, y est presque inconnu et que les méthodes utilisées ne permettent pas d'obtenir dans de bonnes conditions des dépôts épais de nickel.

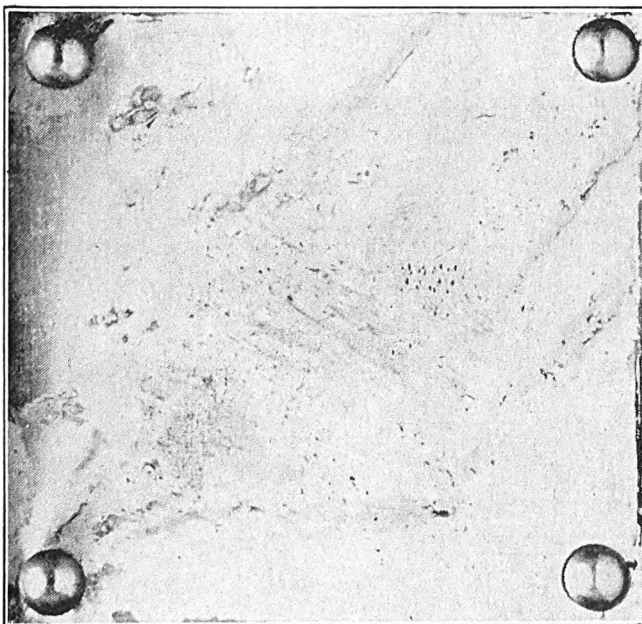
Le cuivrage préalable est intéressant lorsque les méthodes de nickelage très rapide ne peuvent être employées, dans les ateliers où la production est très diverse par exemple. Le cuivre est plus facile à polir que l'acier et quelquefois on effectue un polissage grossier sur l'acier, on cuivre et on polit avec plus de soin ce premier dépôt, avant nickelage. Au polissage, le cuivre, relativement mou, a tendance à s'écraser et à boucher les pores en donnant un dépôt plus continu. Ces avantages sont compensés par des inconvénients : les manipulations sont plus longues, il faut dégraisser les pièces une fois de plus après le polissage du cuivre avant nickelage ; enfin, les risques de décollement du dépôt augmentent avec le nombre d'opérations. A ces inconvénients, il faut ajouter la nécessité de bains de cuivrage : bain de cyanure toxique et de conduite délicate ou bain acide, de conduite aisée, mais dans ce dernier cas trois dépôts successifs sont nécessaires : nickel, cuivre et nickel, le dépôt de cuivre en bain acide ne pouvant se faire directement sur l'acier.

La méthode de nickelage épais a pour elle l'avantage d'une grande simplicité ; les méthodes modernes de dépôt à forte densité de courant qui l'ont rendu possible sont d'application très facile et se prêtent bien à une organisation rationnelle du travail à grand rendement. Cette méthode convient surtout à la production en série ; un dépôt d'épaisseur suffisante peut être obtenu en moins de 15 mn. Les mêmes méthodes conviennent également pour le nickelage de la fonte. La fig. 12 montre une pièce nickelée à faible épaisseur à froid complètement rouillée après 24 heures dans le brouillard salin, alors que les pièces recouvertes d'un dépôt de 25/1 000 d'épaisseur sont encore à peu près intactes après 100 heures.





Chromage direct.



Chromage sur nickel épais.

Fig. 13. — Plaquettes d'acier chromées, l'une directement, l'autre sur nickelage épais après séjour de 240 h. dans le brouillard salin.

## NICKELAGE DES ALLIAGES DE CUIVRE

Pour le cuivre et ses alliages, de même que pour les alliages de plomb, il est inutile en général de nickeler à forte épaisseur ; un dépôt de 0,01 mm d'épaisseur suffit généralement. Le mode de nickelage à adopter dépend des circonstances, les méthodes de nickelage très rapide permettent d'obtenir ce dépôt en six minutes.

## NICKELAGE ET CHROMAGE

Les remarquables propriétés des dépôts de chrome ont donné à ce métal une place de premier plan dans la technique des revêtements électrolytiques. On a vite reconnu que le nickelage et le chromage n'étaient pas des adversaires, mais au contraire se complétaient l'un l'autre. Actuellement, le chrome ne peut être déposé de manière économiquement intéressante qu'en couches très minces : la durée de l'opération est de 5 minutes, et souvent moins ; dans ces conditions, sous une densité de courant de 15 A : dm<sup>2</sup> et un rendement cathodique de 15 pour 100, l'épaisseur de chrome est de 0,001 mm. Un tel dépôt est poreux et ne peut constituer qu'une protection illusoire de l'acier, la fig. 13 illustre ce fait ; les plaquettes d'acier qu'elle représente ont été chromées, l'une directement, l'autre après avoir été recouverte d'un dépôt de nickel de 2/100 de millimètre, les échantillons ont été ensuite placés dans le brouillard salin pendant 240 heures. La plaquette chromée directement est fortement rouillée alors que l'autre est presque intacte. On est donc conduit naturellement à effectuer un premier dépôt épais imperméable et il est admis aujourd'hui que le nickel est le métal qui convient le mieux dans ce but : il est plus dur que le cuivre et possède la même couleur que le chrome. Cette dernière considération est importante, car le pouvoir de répartition du chrome est faible et de petits défauts dans la continuité de la couche de chrome, dans les angles des pièces par exemple, défauts qui passent inaperçus sur couche de nickel, seraient au contraire très visibles sur dépôt de cuivre.

L'opération de chromage constitue une épreuve très sévère pour le revêtement préalable de nickel du fait des tensions très importantes qui existent dans la couche de chrome. Le nickelage préalable doit donc être particulièrement soigné et son adhérence parfaite. Dans de

nombreux ateliers de chromage, des rebuts importants sont imputables à la mauvaise exécution du nickelage. En général, les meilleurs résultats sont obtenus par le nickelage à chaud donnant un dépôt moins fragile après corrosion légère. Nous connaissons des ateliers de chromage où le changement de méthode nickelage a diminué les rebuts dans de très fortes proportions. Cette question très importante est assez complexe, car intervient aussi la conduite du bain de chromage.

### NICKELAGE DU ZINC

Le zinc déplace le nickel des solutions employées pour le nickelage et se recouvre d'un dépôt noir pulvérulent de ce métal. Le nickelage du zinc présente donc quelque difficulté. Deux procédés sont utilisés : nickelage après cuivrage et nickelage direct avec des bains spéciaux.

Le cuivrage préalable permet de traiter toute sorte de pièce, quelle qu'en soit la complexité. Le cuivrage est effectué dans un bain cyanuré et le nickelage peut ensuite être terminé dans une solution quelconque.

Le nickelage direct est plus délicat et n'a pas encore reçu de solution entièrement satisfaisante. On utilise des solutions contenant, soit du citrate de sodium, soit des doses massives de sulfate de sodium ou de magnésium, par exemple répondant aux compositions ci-dessous utilisées à la température ordinaire :

|                                       | I      | II         |
|---------------------------------------|--------|------------|
| Sulfate de nickel cristallisé.....    | 20 kg  | 7 à 14 kg  |
| Chlorure de nickel ou d'ammonium..... | 1,5 kg | 1,3 kg     |
| Acide borique.....                    | 3 kg   | 1,6 kg     |
| Citrate de sodium.....                | 10 kg  | —          |
| Sulfate de soude anhydre.....         |        | 10 à 12 kg |
| Eau.....                              | 100 l  | 100 l      |

Pour éviter la dissolution du zinc avant que la pièce ne soit recouverte de nickel, il est nécessaire de commencer le dépôt avec une densité de courant élevée, 3 à 4 ampères par décimètre carré ; après quelques minutes, la densité de courant est ramenée à sa valeur normale, soit environ 0,7 A : dm<sup>2</sup>. Si ce mode opératoire ne présente pas de difficulté avec une pièce de forme simple où la répartition du courant est très régulière, il n'en est pas de même avec une pièce présentant des saillies et des creux prononcés. Dans les creux, la densité de courant sera très faible et le zinc s'y dissoudra en se recouvrant d'un

dépôt noir de nickel ; dans les angles saillants le dépôt tendra « à brûler ». L'opération est toutefois plus facile avec les alliages de zinc utilisés pour le moulage sous pression et le nickelage direct du zinc est de pratique courante aux Etats-Unis pour certaines pièces.

Les dépôts directs de nickel résistent mieux à la chaleur que les dépôts effectués sur cuivre ; dans ce dernier cas, en effet, la couche de cuivre est absorbée lentement par le zinc et le dépôt de nickel se décolle et ne présente plus qu'une adhérence très faible ; ce phénomène qui peut demander plusieurs années à la température ordinaire, se produit en quelques heures à 100°C.

#### NICKELAGE DE L'ALUMINIUM

Lorsqu'on essaie de nickeler un objet d'aluminium bien dégraissé le dépôt se fait très mal et n'est pas adhérent ; on attribue ce fait à la formation d'une pellicule d'alumine extrêmement mince qui forme une solution de continuité entre le métal constituant l'objet et la couche de nickel.

Différentes méthodes ont été proposées pour le nickelage de l'aluminium ; elles consistent toutes à créer en surface des pièces des rugosités dans lesquelles le dépôt s'ancre. Ces rugosités peuvent être obtenues par corrosion chimique ou mécaniquement par décapage au jet de sable.

La méthode chimique a fait récemment l'objet d'un travail de Work qui propose dans la préparation des pièces différents réactifs suivant la composition de l'alliage ; cette méthode ne paraît pas s'être répandue en France où on considère le nickelage de l'aluminium comme un problème difficile sinon impossible.

Le décapage au jet de sable permet d'obtenir des dépôts très adhérents, mais ne peut être pratiquement employé quand les pièces doivent être polies, la surface étant rendue beaucoup trop rugueuse par le sablage.

Notons toutefois qu'une méthode chimique de préparation des pièces avant nickelage est actuellement à l'étude qui paraît devoir apporter une solution très simple et très générale du problème du nickelage de l'aluminium et de ses alliages.

---

M. R. Thompson, The nickel plating of zinc and zinc-base die castings Trans. of the Electroch. Society. Avril 1925.

MÉTHODES D'ESSAIS DES COUCHES NICKELÉES ET RÉSULTATS DONNÉS  
PAR LES MÉTHODES MODERNES

Un bon dépôt de nickel doit adhérer fortement à son support et être aussi peu perméable que possible. On s'est efforcé de créer des méthodes d'essais permettant la mesure, ou tout au moins l'appréciation rapide de ces propriétés.

L'adhérence peut être évaluée par les essais d'emboutissage de pliage ou de torsion. Le dépôt est effectué sur une bande ou une pla-

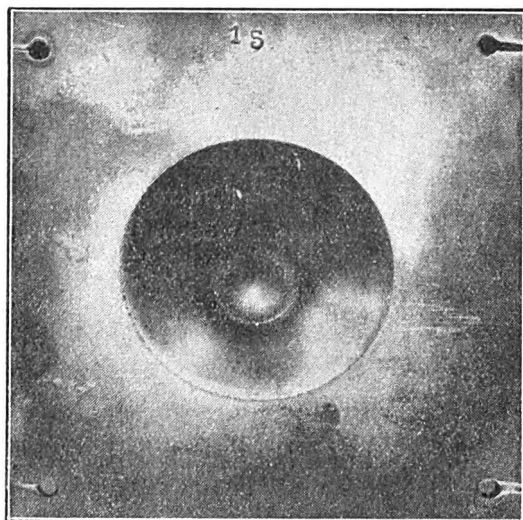


Fig. 14. — Plaquette d'acier nickelée.

que mince que l'on soumet à l'essai après avivage en notant la déformation pour laquelle le dépôt commence à lever ou à se fissurer. L'essai le plus sévère consiste à plier la tôle à bloc puis à l'ouvrir à nouveau en continuant ces pliages successifs jusqu'à rupture ; les dépôts effectués dans de bonnes conditions sur acier ou alliage de cuivre supportent cet essai sans aucun décollement autour de la cassure même si leur épaisseur atteint 25/1 000 de millimètre. La fig. 14 représente une plaquette d'acier nickelée pendant 15 minutes sous 10 ampères par  $\text{dm}^2$  (Épaisseur 25/1 000 de mm) puis chauffée à  $850^\circ$  et refroidie à l'eau avant emboutissage. Aucun décollement ne s'est montré à l'essai.



Emboutissage jusqu'à rupture de la calotte sans décollement autour de la rupture.

Pliage à bloc répété jusqu'à rupture de la tôle sans décollement.

Séjour de 100 heures dans le brouillard d'eau salée à 20 pour 100 de chlorure de sodium, sans aucun décollement ni soulèvement du dépôt. Les taches de rouilles doivent être peu nombreuses et disparaître facilement par avivage sans laisser de traces très visibles.

### CONCLUSION

Je voudrais, en terminant, insister à nouveau sur l'importance du contrôle scientifique dans l'industrie du nickelage. Il faut répéter bien haut que ce contrôle est nécessaire, ici comme ailleurs, et que, bien compris, il abaisse le prix de revient. Les méthodes modernes de nickelage à moyenne et forte densité de courant ont fait leurs preuves ; on leur a reproché d'exiger un contrôle précis, de la concentration en ions H par exemple, mais il a fallu reconnaître que leurs avantages compensaient amplement la mesure du pH ; c'est seulement parce que l'on exigeait peu des anciennes méthodes qu'elles ne demandaient pas de contrôle. Les méthodes de contrôle utilisées aujourd'hui sont d'ailleurs extrêmement simples et d'un prix infime si l'on veut bien réfléchir à ce que fait perdre une journée de mauvais travail dans un atelier.

L'industrie française du nickelage possède aujourd'hui une technique lui permettant de remplir les conditions souvent très dures qui lui sont imposées, notamment par la fabrication de l'automobile. Si pendant longtemps elle fut en retard, sur celle de nos amis américains par exemple, elle a conquis une des premières places et vient en tête, de beaucoup, pour les densités de courant utilisées par plusieurs usines. Les procédés rapides sont en plein développement dans notre pays. Comme partout, des progrès restent à réaliser ici et nous serions heureux si l'exposé que nous venons de faire pouvait en suggérer quelques-uns.

---

# EXTRACTION ÉLECTROLYTIQUE DE L'ÉTAIN ET DU CUIVRE, DES DÉCHETS DE BRONZE <sup>(1)</sup>

par M. le Professeur O. SCARPA

Directeur du Laboratoire d'Electrochimie de l'Ecole Royale Polytechnique de Milan

---

*Après avoir rappelé l'intérêt industriel que présente la récupération du cuivre et de l'étain contenus dans les déchets de bronze, les difficultés techniques que rencontre l'application de la méthode électrolytique, l'Auteur expose l'application industrielle faite de sa méthode en Italie depuis 1923, et insiste notamment sur les procédés employés pour maintenir constantes la composition et la température de l'électrolyte et pour traiter les boues.*

*Intérêt et difficultés de l'opération.* — Les déchets des bronzes provenant surtout de la démolition des navires constituent un matériel très abondant et de grande valeur.

L'utilisation la plus directe est la fusion accompagnée d'un affinage convenable. Mais une difficulté se présente, surtout lorsqu'on veut reconstituer, en partant de ces déchets, des bronzes de qualité.

Elle provient de certains constituants qu'il est presque impossible d'éliminer par les traitements ordinaires.

Les déchets de bronze contiennent, en effet, généralement en plus du cuivre et de l'étain, du zinc, du plomb, de l'antimoine, du fer, etc... et quelquefois aussi de l'aluminium.

Le plomb, et surtout l'antimoine, sont difficiles à éliminer par les traitements thermiques, alors que les bronzes pour des buts spéciaux (bronzes de qualité) doivent avoir une composition et des titres parfaitement déterminés.

D'autre part, le prix assez fort du cuivre, et plus encore celui de l'étain, prix qui en août dernier étaient en Italie (gare de Milan) de 8 800 liras par tonne de cuivre et de 22 000 liras par tonne d'étain, montrent que l'extraction du cuivre et de l'étain de ces déchets peut être très rémunératrice.

---

(1) Communication présentée à la 3<sup>e</sup> Section de la Société française des électriciens le 16 novembre 1929.



En effet, si l'on considère que les déchets de bronze contiennent en moyenne (comme on le verra plus loin) 86 pour 100 de cuivre et 7,5 pour 100 d'étain, la valeur de ces métaux dans une tonne de déchets de bronze est (au cours actuel) de 7 600 livres pour le cuivre et de 1 580 livres pour l'étain, c'est-à-dire en total : 9 180 livres ; ce qui fait une différence de 3 180 livres par tonne de bronze, puisque le prix des déchets de bronze était à la même époque (gare de Milan) seulement de 6 000 livres la tonne.

Une différence si forte montre quel bénéfice on peut tirer de cette industrie si on trouve le moyen d'obtenir le cuivre et l'étain à l'état de pureté demandé par le marché de ces métaux et d'opérer l'extraction à un prix raisonnable.

Une industrie de ce genre a été faite en Allemagne pendant la guerre. la pénurie de cuivre et d'étain a poussé les Allemands à utiliser dans ce but tous les objets, les pièces des machines, les cloches en bronze, etc., qu'ils ont pu saisir dans les pays envahis = et on sait qu'ils ont appliqué des procédés par voie ignée, et des procédés électrochimiques, mais les détails techniques sont restés secrets.

D'une manière générale, on peut dire que la méthode par voie ignée est applicable lorsqu'on a des déchets de bronze assez purs, mais doit être écartée (si l'on veut arriver à des bronzes de valeur) pour traiter les déchets de toute sorte que l'on trouve sur le marché.

Quant à la méthode électrolytique, on doit noter qu'elle présente des difficultés surtout à cause des oxydes d'étain qui se forment en partie à l'état colloïdal pendant l'attaque électrolytique des anodes. Ils peuvent, en effet, causer des pertes considérables et souiller le cuivre produit à la cathode.

On rencontre aussi de grandes difficultés dans le traitement des boues anodiques pour extraire l'étain à l'état de grande pureté, tel qu'il est demandé par les acheteurs.

*Application de la méthode de l'auteur.* — En 1923, j'ai eu l'occasion d'étudier ce problème au point de vue scientifique et au point de vue industriel, et les méthodes auxquelles je suis arrivé (qui en partie sont brevetées) <sup>(1)</sup> ont permis de vaincre ces difficultés.

---

(1) Brevet Français 591 363, janvier 1925. Brevet anglais 227 125 janvier 1925. Brevets italiens 227 161 et 227 988.

Avec les procédés dérivés de mes recherches, furent traitées, dans une usine italienne, environ 4 500 tonnes de bronze dont furent extraites les quantités correspondantes de cuivre et d'étain à l'état de parfaite pureté.

Après trois ans de travail, des conditions spéciales, (variations dans le marché des métaux, augmentation du coût de l'énergie et surtout conditions tout à fait particulières à la Société qui exploitait cette industrie) ont conduit à arrêter l'usine.

Mais cette industrie conserve un intérêt très grand surtout pour les pays qui, comme la France, ont une marine puissante et de grands ports dans lesquels on démolit beaucoup de navires.

C'est en effet le bronze provenant de la démolition des navires qui entre pour la majeure partie dans le marché actuel des vieux bronzes.

*Exposé de la méthode.* — Le titre moyen des bronzes traités électriquement en Italie était le suivant, en centièmes :

|          |        |
|----------|--------|
| Cu.....  | 86     |
| Sn ..... | 7,5    |
| Ph.....  | 2      |
| Zn.....  | 4,2    |
| Fe.....  | 0,1    |
| Sb ..... | 0,1    |
| Ph {     |        |
| As }     | traces |

Les morceaux de bronze étaient fondus dans de grands fours chauffés au naphte <sup>(1)</sup> et coulés en forme de plaques ayant à peu près 1 mètre carré de surface et 3 cm d'épaisseur. Ces plaques étaient suspendues comme anodes dans de grands bacs d'électrolyse contenant 16 anodes et 15 cathodes dans lesquels circulait l'électrolyte chaud, contenant du sulfate de cuivre et de l'acide sulfurique. La tension appliquée sur chaque cuve était, en moyenne, d'environ 0.4 V. Les cathodes étaient constituées originellement par de minces feuilles de cuivre électrolytique préparées dans des bacs spéciaux ; sur ces cathodes le cuivre se déposait jusqu'à l'épaisseur d'environ 1 cm (le poids final des cathodes était d'environ 40 kg).

---

(1) Les crasses étaient, naturellement, traitées dans l'usine pour récupérer l'étain et le cuivre.

Le rendement moyen de l'électrolyse en courant, a été de 90 pour 100 mais aurait pu être plus élevé si la surveillance des bacs avait été meilleure.

La consommation d'énergie électrique a été de 0,665 kWh par kilogramme de cuivre produit.

La capacité de production de l'usine était de 2 000 t de cuivre par an.

Le cuivre a été obtenu au titre de 99,97 pour 100.

Pendant l'électrolyse, tout le cuivre se dépose sur les cathodes <sup>(1)</sup> et presque tout l'étain va dans les boues ; comme on le verra plus loin, on récupérerait l'étain par voie électrolytique dans une installation appropriée.

*Maintien de la constance de l'électrolyte.* — Comme nous l'avons dit plus haut, la principale difficulté de ces traitements est la formation d'oxydes d'étain à l'état colloïdal.

Une autre difficulté est la variation du titre de l'électrolyte en sulfate de cuivre et en acide sulfurique, titre qui, pour une bonne électrolyse, doit rester constant.

Cette variation provient du fait que, pour chaque équivalent de cuivre déposé sur la cathode, entre en solution (par attaque anodique) une quantité de cuivre notablement plus petite, puisque, à l'anode, se forment plusieurs sulfates (de cuivre, de plomb, de zinc, de fer, etc...).

De plus, il se produit de l'acide sulfurique libre, par hydrolyse du sulfate d'étain.

Ces variations de constitution de l'électrolyte sont tout à fait différentes de celles qui accompagnent le raffinage du cuivre : dans ce dernier cas, on traite en effet des anodes qui titrent environ 99 pour 100 de cuivre et ne présentent pas comme impureté l'étain, donnant lieu à des phénomènes spéciaux.

J'ajoute que l'oxyde d'étain à l'état colloïdal a une action favorable sur le dépôt du cuivre (sur le grain du métal) lorsqu'il existe dans l'électrolyte en quantités assez petites, mais provoque un dépôt noir et très impur lorsqu'il s'y trouve en quantité exagérée.

Pour maintenir, pendant toute la durée de l'électrolyse (qui doit marcher régulièrement jour et nuit), le même titre en acide libre, en

---

(1) Comme dans le raffinage du cuivre, une toute petite quantité de cuivre tombe dans les boues à l'état de poussière métallique due aux réactions secondaires dans l'électrolyte.

sulfate de cuivre, et en oxyde d'étain, et la même température dans les limites assignées, j'ai breveté trois méthodes.

La disposition qui a été réalisée dans la pratique est représentée schématiquement par la figure 1 :

1 est le bac d'électrolyse (pour simplifier le dessin, un seul bac a été représenté) ;

2 indique un système de pompes qui refoulent l'électrolyte, sortant des bacs, dans le bassin (20). De ce bassin sortent deux conduites : la conduite 16, qui reconduit une partie de l'électrolyte aux bacs d'électrolyse et la conduite 15, qui envoie l'autre partie de l'électrolyte

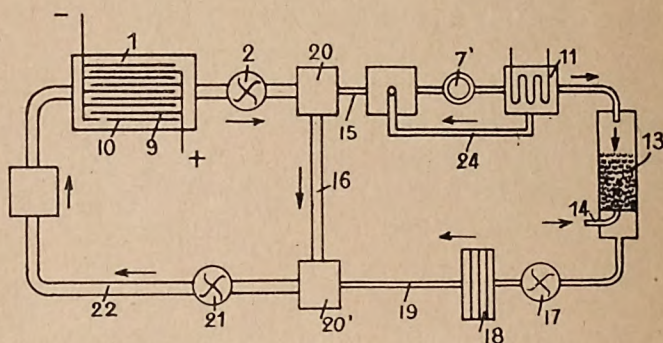


Figure 1.

dans des bassins de coagulation des oxydes d'étain et de décantation (11).

De ces bassins, l'électrolyte est envoyé dans la colonne 13 remplie de morceaux de cuivre, de constitution et forme appropriées qui grâce à une injection d'air et de vapeur (injecteur 14) permettent de neutraliser l'excès d'acide sulfurique libre et d'enrichir ainsi l'électrolyte de la quantité de sulfate de cuivre perdue pendant l'électrolyse.

La vitesse des courants liquides dans les conduits 15 et 16 est réglée avec des vannes, et bien que cette régulation doive être faite avec beaucoup de précision, elle n'a jamais donné d'ennuis dans la pratique, grâce aux dispositions prises.

Dans les bassins de coagulation (11), l'électrolyte est chauffé à un degré suffisant pour produire la coagulation de tout l'oxyde d'étain colloïdal qu'il contient. Cet oxyde, après coagulation, se dépose dans des bassins de décantation et l'électrolyte sort, en général, dans un

état de pureté suffisante pour être traité dans les colonnes d'enrichissement.

Pendant l'électrolyse entrent aussi en solution les métaux donnant des sulfates solubles ; en particulier le zinc et le fer.

Je peux dire qu'après deux ans de travaux, l'électrolyte a titré 9 pour 100 de zinc et 0,6 pour 100 de fer, et que malgré ces teneurs assez fortes on ne rencontrait pas de difficultés. Naturellement, l'électrolyte doit être revivifié, lorsque la teneur des impuretés devient trop grande.

*Traitement des boues.* — Les boues des bassins sont constituées presque exclusivement d'oxydes d'étain et sont traitées avec les boues des bacs d'électrolyse pour l'extraction de l'étain.

Les boues des bacs d'électrolyse contiennent principalement, avec les oxydes d'étain, du sulfate de plomb, du cuivre métallique, du sulfate de cuivre, du sulfate de zinc et de fer à l'état d'absorption, des sels basiques d'antimoine et des traces d'arsenic et de phosphore.

La composition moyenne de ces boues a été, en centièmes :

|            |        |
|------------|--------|
| Eau .....  | 35     |
| Sn.....    | 25     |
| Cu.....    | 8      |
| Pb.....    | 7      |
| Zn.....    | 3      |
| Fe.....    | 0,3    |
| Sb.....    | 0,5    |
| As } ..... | traces |
| Ph } ..... |        |

L'étain est à l'état d'acide stannique et métastannique dont une partie seulement est facilement attaquant par la soude.

On a étudié deux méthodes principales pour l'extraction, des ces boues, de l'étain à l'état pur.

La première comporte, après des purifications mécaniques et chimiques, la réduction thermique des oxydes et le traitement électrolytique de l'alliage obtenu par voie électrolytique.

Si, dans les traitements préalables, on réussit à enlever des boues presque tout le cuivre, on obtient par cette méthode, de l'étain à l'état de pureté parfaite, avec un prix global d'extraction très réduit. Mais une grave difficulté réside dans cette élimination du cuivre, puisque

l'alliage que l'on soumet à l'électrolyse pour l'extraction de l'étain pur devient passif si la teneur en cuivre n'est pas excessivement faible.

L'autre voie est celle qui a été appliquée dans l'usine et qui a permis de travailler les boues provenant de presque tout le bronze utilisé. Elle consiste à attaquer les boues par des solutions chaudes de soude.

Deux traitements sont nécessaires : dans le premier, ces solutions doivent avoir une concentration moyenne, et dans le second (pour traiter les résidus) elles doivent être beaucoup plus concentrées en soude

On arrive ainsi à faire passer en solution (à l'état de stannate de soude) 95 pour 100 de l'étain contenu dans les boues. Mais, puisque le liquide résultant contient aussi du plomb, du zinc, et une petite quantité d'antimoine, il est nécessaire de le purifier chimiquement avant de le soumettre à l'électrolyse. Une fois purifiée, cette solution de stannate de soude était électrolysée entre des anodes de fer et des cathodes constituées par de minces feuilles d'étain sur lesquelles l'étain se dépose à l'état presque spongieux, mais très pur.

Le rendement en courant de cette électrolyse est supérieur à 80 pour 100 si la température, la densité de courant et la concentration de l'électrolyte sont appropriées, mais il diminue lorsque la solution devient plus pauvre en stannate. En moyenne, il n'a pas été supérieur à 50 pour 100. Dans la pratique, la consommation d'énergie a été d'environ 10 kWh par kg d'étain obtenu.

Les cathodes d'étain, après lavage à l'eau courante, étaient fondues dans des fours à réverbère et le métal coulé en lingots de 50 kg qui étaient vendus au prix du meilleur étain du commerce (*étain des Détroits*).

Les derniers 5 pour cent d'étain restant dans les boues n'étaient pas perdus, parce que les résidus, après le second traitement avec la soude, étaient réduits au réverbère, et l'alliage obtenu (qui contient beaucoup de cuivre) était électrolysé pour récupérer le cuivre et obtenir une nouvelle boue riche en étain qui était traitée à part.

Dans ces résidus, on a trouvé en effet de l'or et de l'argent.

La soude qui sert à ces traitements, est perdue en partie à cause des réactions qui accompagnent l'attaque des boues par l'alcali ; mais on a, comme sous-produits, du sulfure de plomb et du sulfure de zinc qui peuvent être utilisés.

*Conclusions.* — Le problème de l'utilisation électrochimique des déchets de bronze, même très impurs, a été complètement résolu.

La difficulté de cette industrie réside seulement dans les forts capitaux qu'elle immobilise, à cause des prix du cuivre et du bronze, et à cause des fortes quantités de ces métaux contenues dans les bacs d'électrolyse pour le travail, et dans les magasins comme réserves de matières premières.

Pour une usine capable de travailler 4 tonnes de bronze par jour, il faut dépenser environ 2 000 000 de francs français pour les installations chimiques, électrochimiques et électriques (bâtiments et terrains exclus) et immobiliser 3 000 000 de francs français pour les métaux en voie de travail et en réserve.

Cependant, le bénéfice de cette industrie est très important si l'affaire est rationnellement conduite au point de vue de la vente et de l'achat des métaux.

Les conditions actuelles du marché du cuivre, de l'étain et des déchets de bronze, rendent cette industrie intéressante à tous points de vue dans les pays où la matière première est abondante et où le prix de l'énergie électrique et du combustible ne sont pas prohibitifs.

---

## OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ <sup>(1)</sup>

### ECLAIRAGE

**Introduction à l'étude de l'optique appliquée**, par Charles FABRY, professeur à la Sorbonne et à l'Ecole Polytechnique, directeur général de l'Institut d'optique théorique et appliquée, éditions de la Revue d'optique théorique et instrumentale, 3 et 5, boulevard Pasteur, Paris 15°. Un ouvrage de 22×15 cm., 157 pages 1928, broché (Don de l'auteur).

**Leçons de Photométrie, année 1928**, par Charles FABRY, professeur à la Sorbonne et à l'Ecole Polytechnique, directeur général de l'Institut d'optique théorique et appliquée, éditions de la Revue d'optique théorique et instrumentale, 3 et 5, boulevard Pasteur, Paris 15°. Un ouvrage de 22×15 cm., 145 pages, broché. (Don de l'auteur).

**Introduction générale à la Photométrie, année 1927**, par Charles FABRY, Professeur à la Sorbonne et à l'Ecole Polytechnique, Directeur général de l'Institut d'optique théorique et appliquée. Editions de la Revue d'optique, 3 et 5, boulevard Pasteur. Un ouvrage relié 25×16 cm., 178 pages, année 1927 (Don de l'auteur).

### TÉLÉGRAPHIE — TÉLÉPHONIE — TRANSMISSIONS PAR ONDES

**Installations téléphoniques**, par PARÉSY. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris. Un ouvrage broché 21×14 cm. de 410 pages, année 1930 (Don de l'Editeur).

### RECHERCHES PHYSIQUES

**Les étapes de la Physique**, par VOLKRINGER H. Edité par Gauthier-Villars, 55, quai des grands-Augustins, Paris. Un ouvrage broché 21×14 cm., 220 pages, année 1929 (Don des Editeurs).

**Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire**, par LOUIS DE BROGLIE. Edité par la Librairie Scientifique Hermann et C°, 6, rue de la Sorbonne, à Paris. Un ouvrage broché 25×16,5, 292 pages, année 1930 (Don des Editeurs). Prix 85 francs.

**Recueils d'exposés sur les ondes et corpuscules**, par LOUIS DE BROGLIE. Edité par la Librairie Scientifique Hermann et C°, 6, rue de la Sorbonne, à Paris. Un ouvrage broché 25×16,5, 80 pages, année 1930 (Don des Editeurs). Prix 20 francs.

**Conférences d'actualités scientifiques et industrielles**, par MM. LOUIS DE BROGLIE, G. FOEX, E. BLOCH, L. DUNOYER, G. RIGAUD, Lt-COLONEL JULLIEN, L. BLOCH-KAMMERER, RENÉ MESNY. Edité par la Librairie Scientifique Hermann et C°, 6, rue de la Sorbonne, à Paris. Un ouvrage broché 25×16,5 271 pages, année 1929, broché (Don des Editeurs). Prix 35 francs.

### ENSEIGNEMENT

**Leçons élémentaires de Physique**, par Albert TURPAIN. Edité par la Librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris. Deux volumes brochés 22×14 cm., le 1<sup>er</sup> 470 pages, le 2<sup>e</sup> 940 pages (Don de l'Editeur).

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens, 14, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff, de 14 à 18 heures, tous les jours sauf le dimanche.



# BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

---

## RECHERCHES PHYSIQUES

**Œuvres scientifiques de Jules Janssen**, membre de l'Institut de France et du Bureau des Longitudes, Directeur de l'Observatoire d'astronomie physique de Meudon, recueillies et publiées, par Henri DEHÉRAIN, Conservateur de la Bibliothèque de l'Institut de France. — Tome Premier. — 1929. Editeur : Société d'éditions géographiques Maritimes et Coloniales, 184, boulevard Saint-Germain, Paris (6<sup>e</sup>). (Don de l'Editeur).

Les travaux de l'illustre savant, se trouvaient dispersés dans de nombreuses publications périodiques ou conservés dans les archives de l'Institut. Mlle Janssen qui fut associée intimement à la vie scientifique de son père et a suivi au jour le jour ses travaux à Meudon et à Chamonix se donna pour tâche, de glorifier sa mémoire, en publiant ces œuvres éparées en même temps que celles restées inédites. Mlle Janssen n'eut pas la joie d'achever cette tâche. Elle exprima en ses dernières volontés le désir que M. Deherain, le fils d'un ami et collaborateur du grand savant, la terminât.

Dans cet ouvrage, les œuvres sont rangées dans l'ordre chronologique de leur publication. Le tome premier contient les travaux faits de 1859 à 1885, sur l'ophtalmoscopie, la spectroscopie, l'analyse spectrale, la photographie des astres, l'astronomie, la physique céleste, et le compte rendu de missions scientifiques.

## MESURES

**Empfindliche galvanometer fur gleich und wechselstrom.** von Dr Otto WERNER, Vol. 16,5 x 24,5 cm. de 208 pages, 23 figures et 17 tableaux, 1928. Prix broché : 13 Rm, relié : 14 Rm. Editeur : Walter de Gruyter et Cie. Berlin et Leipzig. (Don de l'Editeur.)

Cet ouvrage est consacré à l'étude des galvanomètres sensibles pour courants continus et courants alternatifs.

Les appareils à cadre mobile y occupent une place importante.

Les électrodynamomètres, les oscillographes, les appareils thermiques font l'objet de chapitres spéciaux.

Le mode d'emploi de ces appareils pour les mesures électriques est indiqué dans les derniers chapitres de l'ouvrage. Une abondante bibliographie contenant quelques références à des publications françaises est placée à la fin du volume qui intéresse les techniciens, les ingénieurs, les physiciens et les étudiants.

**Comptage de l'énergie électrique en courants alternatifs**, par J. TARTINVILLE, Ingénieur E. C. P., Directeur de la Société d'électricité du Littoral normand, volume 16 x 25 cm, VIII, 152 pages, 118 figures. — 1929. — Relié : 44,50 fr ; broché : 35,50. Editeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (6<sup>e</sup>). (Don de l'Editeur).

Dans la plupart des installations domestiques, 40 à 50 pour cent du courant consommé passe par les compteurs sous un débit d'environ un cinquième à un dixième de la capacité de ces appareils ; dans celles qui utilisent de nombreuses lampes en veilleuse, dans les théâtres, les hôpitaux, les églises, etc. Ces conditions de fonctionnement des compteurs correspondent à un pourcentage encore plus faible du courant total consommé.

La précision et la sensibilité d'un compteur à très faible charge sont donc des qualités que le producteur distributeur a le plus grand intérêt à rechercher ; il est

nécessaire, en outre, que ces qualités se conservent à haute charge, et même jusqu'à 125 pour cent de la capacité nominale des appareils employés.

Quelles sont les imperfections des compteurs actuels et les facteurs qui influent sur leur exactitude? Quels procédés de vérification, de réglage et de contrôle doit-on employer? Quelles sont les conséquences des erreurs de montage et de tous les incidents qui peuvent se produire en cours d'exploitation? Comment organiser un service de compteurs dans une Société de distribution, quels genres d'appareils doit-on choisir, comment doit-on les entretenir, comment éviter les fraudes? Telles sont les questions qui sont étudiées par l'auteur dans l'ouvrage qu'il destine aux Administrations, aux Compagnies de distributions d'électricité, aux Ingénieurs et aux Constructeurs d'appareils et où l'on trouve en outre l'exposé des divers systèmes de tarification et l'étude des compteurs spéciaux qu'ils emploient.

### ENSEIGNEMENT

**Corso teorico-pratico di Elettrotecnica**, par Luigi LOMBARDI, Professore di elettrotecnica nella R. Scuola di Ingegneria di Roma. — Biblioteca di Scienze fisiche e naturali.

Cette nouvelle édition du Cours de M. Luigi Lombardi a conservé la même répartition des matières et les mêmes notations (celles de la Commission électrotechnique internationale) que celles qui l'ont précédée; mais, un plus grand développement a été donné aux chapitres relatifs aux machines à courant continu, aux machines à courants alternatifs et à ceux qui sont consacrés à l'étude et à la construction de ces machines. Elle contient de nombreuses références aux ouvrages et articles de revues techniques parus tant en Europe qu'en Amérique et se rapportant au fonctionnement et à la construction des machines et des appareils électriques. Le volume « Production de l'énergie électrique » comprend deux parties consacrées, respectivement, aux génératrices à courant continu et aux génératrices à courant alternatif et précédées d'une introduction contenant des généralités sur les machines dynamo-électriques.

**Principii scientifici di elettrotecnica**, par M. Luigi LOMBARDI, Professore di elettrotecnica nella R. Scuola di Ingegneria di Roma, 3<sup>e</sup> edizione interamente riveduta e ampliata vol. 17,5 x 25 cm. 530 p. avec 153 figure intercalate nel testo. 1928, della Nuova Bibliotica Scientifica e tecnica. Casa editrice Libreria Raffaele Pironti, Napoli, 19, via Università (Hommage de l'Auteur.)

Ces magistrales leçons de M. Luigi Lombardi sur les « Principes scientifiques de l'Électrotechnique » forment l'introduction au « Cours théorique et pratique d'électrotechnique que professe l'éminent professeur, le savant continuateur du célèbre Galileo Ferraris, à la R. Scuola di Ingegneria di Roma. Elles se rapportent au Magnétisme, à l'Électrostatique, à l'Électromagnétisme, à l'Électrodynamique, à l'étude des propriétés des courants continus et des courants alternatifs, à la propagation des perturbations électromagnétiques, comprenant enfin, un important chapitre consacré aux théories modernes de l'électricité et du magnétisme.

**Cours d'électricité**, par M. VEAUX, Ingénieur en chef des Postes, Télégraphes et Téléphones. Un volume 16 x 25 cm de 451 pages, avec 252 figures. 1929. Prix relié toile: 85 fr. Editeur: Librairie polytechnique Ch. Béranger. Paris, 15, rue des Saints-Pères et Liège, 8, rue des Dominicains (Don de l'Editeur.)

L'auteur a exposé les lois élémentaires de l'électricité en établissant d'une façon claire et précise la coordination qui existe entre elles et les conditions qui régissent leurs applications. L'étude proprement dite des lois de l'électricité est précédée d'un chapitre dans lequel l'auteur rappelle les notions de mathématiques nécessaires à l'étude des courants alternatifs. Le premier chapitre intitulé « Les transformations de l'énergie » traite des diverses transformations de l'énergie, des formes qu'affecte l'énergie et des unités employées pour la définir dans les divers cas. L'énergie mécanique est étudiée en vue de montrer l'analogie qui existe entre ses diverses

formes et celles qu'affecte l'énergie électrique. Cette étude qui est accompagnée d'un très grand nombre d'applications ajoute encore à la clarté du texte, elle facilite la lecture de l'ouvrage et elle met le lecteur à même de résoudre des problèmes d'électricité présentant un certain caractère de nouveauté et sortant du cadre des applications pratiques généralement enseignées.

L'électrostatique et l'étude des condensateurs font l'objet du chapitre II.

Les chapitres III et IV traitent du courant électrique.

Le Magnétisme et l'électromagnétisme sont étudiés dans le chapitre V, le chapitre VI étant consacré à l'étude de la perméabilité du fer, au phénomène d'hystérésis et à l'étude du circuit magnétique.

La self induction et l'induction mutuelle entre deux circuits sont étudiés dans le chapitre VII; les lois de l'électrodynamique et de l'induction dans le chapitre VIII.

Le chapitre IX est consacré à l'étude des courants alternatifs sinusoïdaux. L'ouvrage contient, in fine, des tables donnant les valeurs des sinus, cosinus et tangentes des angles compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ .

#### AIDE-MÉMOIRE. — FORMULAIRES. — MANUELS

**Agenda d'électricité pour 1930**, par MM. P. BUNET et A. CEYRE, Ingénieurs E. P. C. I. — Un volume  $12 \times 16$  cm de 250 pages avec 90 figures, relié souple : 20 fr. Editeur : Librairie J.-B. Baillière et fils, 19, rue Hautefeuille, Paris (6<sup>e</sup>).

Le manuel présenté sous la forme commode d'un agenda de poche contient tous les renseignements nécessaires à l'Ingénieur électricien, ainsi qu'à tous ceux qui s'intéressent aux applications de l'électricité.

Les sujets qui y sont traités, sont classés d'une façon méthodique et ils s'appuient sur une documentation absolument rigoureuse, la rédaction est claire, précise, facile à lire.

Les principaux chapitres se rapportent aux Unités de mesure, aux symboles et aux signes conventionnels internationaux utilisés en électricité, aux propriétés des courants continus et alternatifs, aux machines électriques, à leurs enroulements, au couplage en parallèle des génératrices, aux lignes électriques et à leurs supports, aux montages des électromoteurs. Les dérangements qui se produisent le plus fréquemment dans le fonctionnement des dynamos, des alternateurs des moteurs asynchrones sont étudiés dans un chapitre spécial.

Sont étudiés aussi :

Les transformateurs statiques, les accumulateurs électriques, les appareils d'utilisation pour l'éclairage, le chauffage et toutes les autres applications de l'électricité le transport et la distribution de l'énergie.

La législation et la réglementation relatives aux distributions d'électricité, les conditions techniques auxquelles elles doivent satisfaire sont placées à la fin de ce volume qui, par les renseignements qu'il contient est appelé à rendre comme par le passé les plus grands services aux Ingénieurs et aux Industriels.

**Guide de l'Ingénieur Techno-Comptable**, pour l'organisation des Services de Comptabilité d'une entreprise de production et de distribution d'énergie électrique. — Etude technique, administrative et comptable, par M. LÉON MELOT, Ingénieur civil I. D. N., ancien Directeur de l'Omnium régional d'électricité et de la Société d'électricité de Chartres et extensions, Directeur des Services d'électrification rurale du Département de Loir-et-Cher. Un volume autographié  $17 \times 22$  cm de 416 pages, 83 tableaux. Prix : 35 fr. Editeur : Léon Eyrolles. Librairie de l'Enseignement Technique, 3, rue Thénard, Paris (5<sup>e</sup>). (Don de l'Editeur).

Le but de cet ouvrage est d'établir une liaison effective entre le technicien spécialisé qui exécute les installations et le comptable qui en établit la valeur commerciale. L'auteur envisage un service de « contrôle techno-comptable » dirigé par un ingénieur qui possède en comptabilité les connaissances suffisantes pour être capables de contrôler efficacement les travaux du comptable, et dont le rôle est d'analyser les résultats d'exploitation dès que les balances mensuelles sont arrêtées, d'étu-

dier les prix de revient afin de pouvoir, en pleine connaissance de cause, signaler à l'ingénieur d'exploitation les modifications qu'il y a lieu d'introduire dans les méthodes pour aider au développement de l'entreprise.

La première partie est relative au « Rôle et fonctionnement des Comptes ». La seconde traite « ses relations entre la comptabilité sociale et la comptabilité fiscale ». « L'organisateur des services comptables et techno-comptables » est étudiée dans la troisième partie de l'ouvrage qui se termine par 81 modèles d'imprimés en usage dans les services comptables d'une entreprise de distribution d'électricité et deux tableaux schématiques des relations qui existent entre les services de comptabilité et les services techniques d'exploitation.

**Agenda Béranger 1930** à l'usage des Ingénieurs, Architectes, Mécaniciens, Industriels, Electriciens, Amateurs de T.S.F., Automobilistes et, en général, de tous les praticiens. Un volume 10×18 cm comprenant 340 pages de texte et de nombreuses figures et un agenda année 1930, 2 jours par page. Editeur : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 15, rue des Saints-Pères, Paris, et 1, quai de la Grande-Bretagne, Liège (Belgique). (Don de l'éditeur.)

Ce livre contient un chapitre « Généralités » donnant les diverses unités employées tant en France qu'à l'étranger, un chapitre « Mathématiques », un autre consacré à la « Banque ». Celui qui se rapporte aux Travaux Publics et aux Bâtiments donne tous les tableaux numériques utilisés par l'Ingénieur et l'Architecte. Il en est de même de celui qui est consacré à la mécanique.

On y trouve également des chapitres consacrés à l'Electricité et à la T. S. F., à l'automobile et à l'aéronautique.

**Agenda Dunod 1930** « Physique Industrielle », par J. IZART, Ingénieur Conseil, 10<sup>e</sup> édition. Un volume 10×15 cm de xxxii et 520 pages, 140 figures. Prix franco : France et ses colonies, relié pégamoïd, 17 fr 85. Editeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (6<sup>e</sup>).

Le sujets suivants sont traités dans cette nouvelle édition :

Unités, mesures, températures, pressions, densités.

Poids atomique.

Thermodynamique, chaleur, transmission, échange.

Propriétés des gaz et des vapeurs : hydrométrie, séchage, évaporation, condensation.

Mouvement des liquides, pompes.

Mouvement des gaz sous faible pression, ventilateurs.

Mouvement des gaz sous pression : air comprimé, froid.

Combustion : foyers, contrôle de la combustion.

Générateurs de vapeur et accessoires : économiseurs, surchauffeurs, canalisations de vapeur.

Moteurs à vapeur et condenseurs.

Gazogènes et moteurs à combustion interne.

Chauffage, ventilation et rafraîchissement.

Législation du travail.

L'édition de 1930 contient des nouveautés de grand intérêt, notamment : un parallèle entre les pompes centrifuges et les pompes à piston, une étude sur le choix des pressions à adopter pour les chaudières à vapeur, des notes sur l'application du béton cellulaire à la construction des chambres frigorifiques, un tableau des tensions de vapeur employées dans les appareils frigorifiques, un tableau des facteurs utiles intéressant ces appareils.

**L'apprentissage de la T. S. F.**, par André CLAVIER, Ingénieur E. S. E., ancien ingénieur à la radiotélégraphie militaire. 2<sup>e</sup> édition, revue, augmentée et mise à jour. Volume 16×25 cm de 186 pages et 160 figures. Prix broché : 15 fr. Editeur : Albin Michel, 22, rue Huyghens, Paris (Don de l'Editeur).

Comment monter un poste récepteur de téléphonie et de télégraphie sans fil ? L'ouvrage dont M. Clavier publie la 2<sup>e</sup> édition l'indique pour les postes à galène comme pour les appareils à lampes en décrivant minutieusement les moyens à em-

ployer pour construire soi-même toutes les parties essentielles de ces postes et pour en effectuer le montage de manière à obtenir une parfaite réception. L'auteur s'est borné à donner une explication élémentaire mais parfaitement claire des phénomènes qui accompagnent la propagation et la réception des ondes et il a systématiquement limité son exposé aux montages types employés à l'heure actuelle en téléphonie et télégraphie sans fil.

Cette nouvelle édition entièrement revue, comprend, en particulier, l'explication du mécanisme de la transmission des images à distance par l'intermédiaire des ondes électriques.

D'un grand intérêt pour l'amateur, elle fournit au professionnel d'utiles renseignements pratiques.

**Agenda Dunod 1930 « Electricité ».** — Aide-mémoire pratique de l'électricien, par L.-D. FOURCAULT, Rédacteur en chef de l'« Electricien », 49<sup>e</sup> Edition. Volume 10×15 cm de xxxii et 536 pages, 130 figures. Prix franco: France et colonies, relié pégamoïd, 17 fr 85. Editeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (7<sup>e</sup>). (Don de l'Editeur).

Cette nouvelle édition comprend les formules et symboles usuels relatifs à l'électricité, les unités de mesures des grandeurs magnétiques, électrostatiques et électromagnétiques. L'auteur étudie les phénomènes calorifiques et lumineux et expose les méthodes d'éclairage telles qu'elles résultent de plus récents progrès réalisés en cette matière.

Les chapitres suivants sont consacrés à la production de l'énergie électrique, aux canalisations puis à la transformation de l'énergie, aux accumulateurs, à l'électrochimie et à ses applications.

Les moteurs sont ensuite étudiés ainsi que les conditions auxquelles doivent satisfaire les machines électriques. La distribution de l'énergie électrique est traitée en détail. Le chapitre relatif à la radiotélégraphie et à la radiotéléphonie a été tenu à jour des derniers perfectionnements réalisés. Enfin, toute la législation et la réglementation technique de l'électricité forment le dernier chapitre de la partie technique de l'agenda qui comprend une partie commerciale donnant la liste par spécialités des principaux fournisseurs d'appareils et de machines électriques.

L'édition 1930 contient, entre autres additions, des extraits des nouvelles règles d'exécution et d'entretien des installations intérieures arrêtées par l'U. S. E., le 9 janvier 1929 (fascicule 137); la liste des causes de pannes des postes de T. S. F., des tableaux donnant les propriétés caractéristiques des moteurs à courant continu et alternatif et permettant de déduire les usages auxquels ils s'adaptent le mieux. Le tableau des signes graphiques adoptés par la Commission Electrotechnique internationale pour les dessins de toutes installations électriques.

## LÉGISLATION

**La jurisprudence de la Houille Blanche**, par Achille MESTRE, professeur à la Faculté de droit de l'Université de Paris : un volume 14×22 cm de 84 pages, 1929. Editeur : Librairie du Recueil Sirey (Société anonyme), 22, rue Soufflot, Paris (5<sup>e</sup>). (Don de l'Editeur).

Sous l'empire de la législation antérieure à la loi du 16 octobre 1919, la force hydraulique était à la disposition des riverains des petits cours d'eau. Il en est autrement depuis la promulgation de la loi de 1919; dans quelle mesure les baux de riveraineté sont-ils affectés par le vote de cette loi? Telle est la première question sur laquelle la jurisprudence a dû statuer.

Elle s'est également prononcée sur la nature des travaux entrepris par le concessionnaire de chute d'eau; sont-ils publics ou privés?

Quelles sont exactement les obligations du concessionnaire de chute à l'égard des titulaires de droits exercés, notamment des industriels précédemment établis sur le cours d'eau, qui verraient leur force motrice diminuée ou supprimée par le fait de la nouvelle entreprise concédée. Enfin, la loi de 1919 permet aux propriétaires des terrains occupés par le concessionnaire d'exiger de celui-ci « l'acquisition du sol ». Cette réquisition d'achat est-elle susceptible de s'exercer sous la forme de l'expropriation.

**Propriétaires et Compagnies de distribution d'énergie électrique**, par Achille MESTRE, Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Paris. Un fascicule de 14 × 22 cm de 60 pages, 1925. Editeur : Société anonyme du Recueil Sirey 22, rue Soufflot, Paris 5°. Léon Terrier, Directeur (Don de l'Editeur).

L'auteur étudie les textes législatifs relatifs aux distributions d'énergie électrique et les conflits qui peuvent s'élever entre les propriétaires et les compagnies de distribution. Une première question est examinée : l'article 12 de la loi du 15 juin 1906 vise-t-il seulement les distributions ordinaires d'énergie ou également les lignes de transport à haute tension.

La situation du distributeur au regard des propriétaires dans les cas de permission de voirie, de concession déclarée d'utilité publique et de concession simple est ensuite étudiée par l'auteur dans ce fascicule qui se termine par des annexes comprenant des textes législatifs et des décisions de jurisprudence.

**Le nouveau régime légal des Distributions d'énergie électrique**, par Pierre JOLLY, Docteur en droit, Lauréat de la Faculté de Nancy. Diplômé de l'Ecole des Sciences politiques. — Préface de M. Georges RENARD, Professeur à la Faculté de droit de Nancy. Un volume 14 × 23 cm de 389 pages. — 1925 accompagné d'un supplément de 17 pages mettant l'ouvrage à jour — 1928. Editeur : Société anonyme du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, Paris (5°). (Don de l'Editeur.)

La loi du 15 juin 1906, sur les distributions d'énergie électrique n'était pas parfaite : en n'imposant aucune clause commerciale aux permissionnaires, en omettant de « conditionner » les autorisations octroyées, elle a commis une erreur à laquelle la loi du 27 février 1925 s'est efforcée de remédier.

La situation du concessionnaire qui se trouve chargé d'un service public est différente de celle du permissionnaire qui gère une entreprise d'intérêt public d'un type intermédiaire entre le service public et l'entreprise privée. L'auteur met en évidence cette différence de conception introduite par la nouvelle loi, et il étudie le nouveau régime de permission de voirie qu'elle édicte. L'ouvrage contient ces annexes. Les lois et décrets relatifs aux distributions d'énergie électrique : loi du 15 juin 1906, décret du 3 avril 1908, loi du 19 juillet 1922, loi du 2 août 1923, loi du 27 février 1925.

**Code des Distributions d'électricité (Energie thermique et hydraulique)**, par Etienne CARPENTIER, avocat à la Cour d'appel de Paris, Docteur en droit Sciences juridiques et Sciences politiques et économiques. Un volume de 13 × 18 cm de 417 pages, 1926. — Editeur : Société anonyme du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, Paris (5°). Léon Terrier, Directeur de la Librairie (Don de l'Editeur).

Ce volume contient toute la législation et la réglementation relatives aux distributions d'énergie électrique, c'est-à-dire les lois, les décrets et les circulaires ministérielles concernant les distributions d'électricité soit que l'énergie provienne de sources hydrauliques ou thermiques. Ces documents sont classés par ordres chronologiques du 25 avril 1896 date du décret rendant obligatoire le système international d'unités électriques jusqu'au 18 août 1925 date de l'arrêté modifiant l'arrêté du 26 mai 1921 réorganisant la Commission des distributions d'énergie électrique.

**Standards. — Le travail américain vu par un ouvrier français** par H. DUBREUIL. Préface de H. LE CHATELIER, de l'Académie des Sciences. Volume de la Collection « Les Ecrits », publiée sous la direction de Jean GUYENNO. Un volume 12 × 19 cm de 425 pages, 1929. — Prix broché : 15 fr. Editeur : Bernard Grasset, Paris. (Don de l'Editeur).

Nous ne connaissons les méthodes américaines de travail, dit M. Le Chatelier dans sa préface, que par des publications d'ingénieurs et d'économistes, M. Dubreuil nous apprend comment un ouvrier français a vu le travail américain et ce qu'il a fait lui-même comme ouvrier d'usine.

La psychologie de l'ouvrier américain est assez différente de celle de l'ouvrier français et même de l'ouvrier européen. Chez l'américain froid, les relations sont toujours empreintes de franche cordialité, l'esprit de coopération règne en permanence parmi les travailleurs de tous les échelons hiérarchiques.

L'ouvrier a confiance dans son contremaître, ne discute jamais les ordres, le contremaître ne ménage ni son temps ni sa peine pour faciliter la tâche de l'ouvrier. L'ouvrier ne néglige aucune occasion de s'instruire dans son métier. L'instruction professionnelle qu'il reçoit lui permet d'atteindre le sommet de la hiérarchie industrielle et crée chez lui une mentalité élevée. Le but qu'il poursuit avec le concours bienveillant de ses chefs est l'amélioration des conditions du travail, il n'est donc pas surprenant de le voir recourir sans cesse à l'expérimentation directe, et à la vérification de son travail; il accepte et bien souvent il provoque les instructions du bureau de préparation du travail qu'il sait reposer sur des expériences précises hors de sa propre portée, il n'est pas choqué par les investigations des chronomètres, il se plie facilement au travail à la chaîne. Il a confiance dans ses chefs beaucoup plus près de lui que nous ne le sommes de nos ouvriers. Ces diverses causes expliquent la situation enviable des ouvriers américains.

Pouvons-nous essayer de transporter en Europe les méthodes de travail américaines. M. Dubreuil répond par l'affirmative. La psychologie des hommes est partout la même; leurs différences, dit M. Dubreuil, tiennent avant tout aux conditions diverses dans lesquelles ils ont vécu. Il voit, comme principale différence entre l'Amérique et l'Europe le fait que les américains actuels sont encore peu éloignés de leurs premiers ancêtres, les pionniers qui ont colonisé le désert et la forêt vierge. Pour vivre et se maintenir dans un pays neuf et hostile, ils ont dû s'entraider, peiner et s'astreindre à un effort incessant pour créer les objets nécessaires à la vie. Leurs fils auraient hérité des qualités ainsi acquises. M. Le Chatelier n'est pas tout à fait d'accord sur ce point avec l'auteur, et il s'est fait une idée différente du développement de l'esprit américain.

Pour réaliser l'absorption des éléments étrangers amenés par l'immigration et les transformer en véritables citoyens américains, il a été nécessaire de développer dans une très large mesure l'instruction primaire et de donner aux enfants en même temps qu'une instruction solide une éducation morale supérieure. C'est grâce à cette formation exceptionnelle complétée par un enseignement professionnel post-scolaire — largement subventionné par les milliardaires américains — qu'un si grand nombre d'ouvriers sont des hommes de bon sens, capables de devenir d'excellents chefs d'industrie, n'ayant rien gardé de ce que nous appelons la mentalité primaire. Et M. Le Chatelier conclut :

« Il n'y a rien dans ces œuvres d'enseignement que nous ne puissions imiter en Europe. En le faisant nous augmenterons la puissance productrice des travailleurs, nous élèverons le niveau de leur situation sociale et nous accroîtrons par contre-coup la richesse et le bonheur de tous les Français. »

---

## IL Y A TRENTE ANS

---

1<sup>o</sup> Réunion ordinaire mensuelle du 2 mai 1900

Présidence de M. E. MASCART, Président

M. LANGEVIN fait une communication sur « les ions dans les gaz ».

Le conférencier expose l'ensemble des résultats relatifs à la conductibilité électrique des gaz, ceux-ci étant soumis aux radiations ultraviolettes, à celles de Röntgen, ou à celles des corps radioactifs.

Il décrit les expériences de Crookes et de Perrin démontrant l'existence dans ces gaz de charges positives et de charges négatives, puis celles de Rutherford et de Chattock qui permettent de mesurer les vitesses de ces charges ou leur « mobilité ». Ces dernières expériences montrent que les charges négatives se déplacent plus vite que les positives, dans un même champ.

M. Langevin reproduit les expériences de Shelford et de Wilson sur la condensation de la vapeur d'eau sursaturée dans tout gaz rendu conducteur par un procédé quelconque ; elles justifient l'hypothèse de l'existence dans le gaz rendu conducteur d'un nombre fini de centres chargés, les uns positivement les autres négativement.

Il explique comment J. J. Thomson est parvenu à évaluer le nombre de ces centres, la charge portée par chacun d'eux, puis leur masse ; la concordance dans les résultats des mesures l'a conduit à admettre que l'ionisation consiste en une rupture de l'atome en deux ions dont l'un, l'ion négatif ou corpuscule, est environ la millième partie de l'atome d'hydrogène, l'ion positif représentant le reste de l'atome.



BULLETIN  
DE LA  
**SOCIÉTÉ FRANÇAISE**  
DES  
**ÉLECTRICIENS**

---

**SOMMAIRE**

---

**COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :**

Assemblée générale du Samedi 3 Avril 1930, p. 590.  
Réunion ordinaire mensuelle du Samedi 5 Avril 1930, p. 591.  
Admissions des Membres titulaires, p. 591.  
Distinctions accordées aux Membres de la S. F. E., p. 593.

**COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :**

Recherches sur les surlentensions des orages dans les grands réseaux de distribution (M. le Docteur Harald NORINDER), p. 594.

**RAPPORTS AUX ASSEMBLÉES GÉNÉRALES :**

Rapport du Comité d'Administration, p. 618.  
Rapport de la Commission des Comptes, p. 624.  
Rapport annuel sur le Laboratoire central et l'Ecole Supr<sup>e</sup> d'Electricité, p. 638.  
Rapport annuel du Groupe Sud-Ouest, p. 652.

**INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS**

- a) Présentation de la nouvelle salle de démonstration de la Compagnie des Lampes, p. 636.
- b) Visite du Centre d'études de la Société Industrielle des Procédés W. A. Loth, p. 636.
- c) Remise de la Médaille Mascart à M. P. JANET, p. 657.
- d) Remise de la Médaille Kelvin à M. André BLONDEL, p. 657.
- e) Errata au Bulletin d'Avril 1930, p. 659.

**TRAVAUX DES SECTIONS**

Le guidage des navires et des avions (M. BOURGONNIER), p. 660. — Remarques sur les derniers multiplicateurs statiques de haute fréquence employés en T. S. F. (M. G. E. PETIT), p. 667. — Lampes à gaz rares à basse tension par tache cathodique (M. ABADIE), p. 675. — Ampèremètre de barres et court-circuitmètre (M. VILLIERS), p. 689. — Mesure de courants continus à intensités élevées (M. VASSILLIÈRE-ARLHAC), p. 692.

**OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 696.**

**BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 697.**

**IL Y A TRENTE ANS, p. 700.**

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le **BULLETIN** est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4<sup>e</sup> série, tome X, n<sup>o</sup> 106.

# COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

---

## ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ORDINAIRE

du Samedi 5 Avril 1930

---

Présidence de M. H. PARODI

L'Assemblée générale est ouverte à 16 h. 30 <sup>(1)</sup>.

M. G. E. PETIT lit le rapport établi par les Commissaires aux Comptes. Ce rapport mis aux voix est adopté à l'unanimité.

M. Paul JANET, Directeur du Laboratoire Central et de l'Ecole Supérieure d'Electricité, donne lecture de son rapport annuel sur ces deux Etablissements.

M. GROSSELIN donne lecture du rapport du Comité d'Administration:

L'Assemblée générale est levée à 17 h. 30.

---

---

(1) Les rapports lus ou résumés en séance sont publiés *in extenso* dans le présent Bulletin.

## RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 5 Avril 1930

---

Présidence de M. H. PARODI

La séance est ouverte à 17 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

**Algem** (Société Anonyme), 8, rue Lamennais, Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.

**Alsthom** (Société Générale de Constructions Electriques et Mécaniques), 146, avenue des Champs-Élysées, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Parodi et Girault.

**Andres** (Jules), 15, rue de l'Entrepôt, à Paris (10<sup>e</sup>). — Présenté par MM. de Raemy et R. Deschamps.

**Apraiz** (Félix), Professeur à l'Ecole Industrielle et d'Ingénieurs des Industries textiles, à Tarrasa (Espagne). — Présenté par MM. Grosselin et P. Janet.

**Bourgonnier** (Claude, Tony, Frédéric, Eugène), Directeur de la Société Industrielle des Procédés Loth, 5, rue de Monbel, à Paris (17<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Grosselin et G. E. Petit.

**Bouttes** (Georges), Ingénieur à la Centrale de la Société des Mines de Dourges, 40, route de Douai, à Hénin-Liétard (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Foby et Galante.

**Centre d'information du nickel**, 7 et 9, boulevard Haussmann, à Paris (9<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Marie et Grosselin.

**Compagnie des Lampes** (Société Anonyme), 29, rue de Lisbonne, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Ayral et Maisenneuve.

**Compagnie des Téléphones Thomson-Houston**, 254, rue de Vaugirard, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Grosselin et Reynaud-Bonin.

**Constructions Electriques Nancy** (Société Anonyme), 22, quai de la Bataille, à Nancy (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.

**Doizan** (Frank), Bibliothécaire de la Société Française des Electriciens, 7, rue Valentin-Haüy, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.

**Drevet** (Alexandre, Joseph), Directeur Commercial des Ateliers de Constructions Electriques de Delle, 25, Chemin de Cyprian, à Lyon-Villeurbanne (Rhône), Domicile : 27, rue Lamartine, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. de Raemy et Deschamps.

**Energie Electrique du Rhin** (Société Anonyme), 6, avenue de Modenheim, à Mulhouse (Haut-Rhin). — Présenté par MM. Duval et Koechlin.

**Est-Lumière** (Compagnie d'Electricité de l'Est-Parisien), 12, rue de la Tour des Dames, à Paris (9<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Girousse et Eschwège.

**Grillet** (Jean, Anselme), Ingénieur aux Ateliers de Constructions Electriques de Delle, 211, route de Génas, à Villeurbanne (Rhône). — Présenté par MM. Doudoux et Saudicœur.

**Hertz** (Hjalmar), Président, Duhl Manufacturing Co. Executive. — The Suiger Manufacturing Company, 24 Fifth Avenue, New-York (Etats-Unis). — Présenté par MM. Janet et Abravanel.

**Lhermite** (Maurice, Pierre), Ingénieur des P. T. T., service de la T. S. F., Chef de la Section Radiotélégraphique, Croix d'Hins (Gironde). — Présenté par MM. Grosselin et G. E. Petit.

**De Lillers** (Louis, Michel, Antoine), Elève à l'E. S. E., 10, boulevard de Latour-Maubourg, à Paris (7<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Nord-Lumière** (Le Triphasé), 3, rue de Messeine, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Girousse et Eschwège.

**Ouest-Lumière** (Compagnie d'Electricité de l'Ouest-Parisien), 3, Quai National, à Puteaux (Seine). — Présenté par MM. Girousse et Eschwège.

**Parodi** (Maurice, Alexandre), Elève à l'E. S. E., 141, Quai d'Orsay, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

**Quoirez** (Pierre, Henri), Ingénieur-adjoint à la Direction Commerciale des Ateliers de Constructions Electriques de Delle, 1, rue Bellevue, à Lyon 3<sup>e</sup> (Rhône). — Présenté par MM. de Raemy et Saudicœur.

**Revel-Mouroz** (Michel), Ingénieur chez MM. Brandon, Simonnot, et Rinuy, Ingénieur conseil, 115, boulevard Jourdan, à Paris (14<sup>e</sup>). — Présenté par MM. P. Girault et G. H. Perrin.

**Siemens-France** (Société Anonyme), 17, rue de Surène, à Paris (8<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.

**Société Anonyme d'Entreprises Giraudon**, 55, rue d'Amsterdam, Paris (8<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.

**Société de l'Accumulateur Fulmen**, 14 à 20, quai de Clichy, à Clichy (Seine). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.

**Société d'Equipement des Voies Ferrées et des Grands Réseaux Electriques**, 18, rue de Tilsitt, à Paris (17<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Parodi et Lacabe-Plasteig.

**Société Française de Poteaux Electriques**, 67, rue de Dunkerque, Paris (9<sup>e</sup>). — Présentée par MM. Girousse et Eschwège.

**Société Savoisienne de Constructions électriques**, à Aix-les-Bains (Savoie). — Présentée par MM. Egger et Forest.

**Theillaud** (John), Directeur de la Société Coloniale d'Eclairage et d'Energie, 45, rue Ducau, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. L. Rousseau et G. Rousseau.

**Thiébert** (Louis), Ingénieur au Nord-Lumière, 34, rue Saint-Lambert, à Paris (15<sup>e</sup>). — Présenté par MM. Polack et Veillet.

**Thomas** (Fernand, Jules, Adolphe), Ingénieur-électricien, Licencié ès-sciences, licencié en droit, directeur de la Société Générale Belge de Distribution électrique, 76, avenue de Cortenberg, à Bruxelles (Belgique). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.

**Van Mierlo** (Stanislas, Antoine), Ingénieur chef de service aux Laboratoires Standard, 9, avenue de Montspan, à Versailles-Chesnay (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Deloraine et Reynaud-Bonin.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société Française des Electriciens.

M. le Président fait part des promotions suivantes dans l'ordre de la Légion d'honneur :

*Officiers* : M. LÉAUTE, Administrateur délégué de la Société de Recherches et Perfectionnements industriels ; M. MALEGARIE, Directeur général de la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité.

*Chevaliers*. — M. LEJEUNE, Directeur des Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont ; M. PARE, Directeur général adjoint de la Société Saint-Quentinoise d'éclairage, de chauffage et de force motrice.

M. GONOREL présente une communication sur « *le système de téléphonie automatique de la Compagnie des Téléphones Thomson-Houston, dit Système R.6* ».

Il rappelle quelques principes concernant la téléphonie automatique, indique les caractéristiques essentielles du Système R.6, montre comment les communications s'établissent dans un central automatique de ce type. L'auteur indique également l'application des enregistreurs au Système R.6 ; il expose les avantages du système et fait une description sommaire du Central téléphonique de Nîmes.

M. le Président remercie le Conférencier de son intéressant exposé.

La séance est levée à 18 h. 40.

---

# RECHERCHES SUR LES SURTENSIONS DES ORAGES DANS LES GRANDS RÉSEAUX DE DISTRIBUTION <sup>(1)</sup>

par M. le Docteur Harald NORINDER

*Directeur de la station d'essais d'Uppsala*

*L'auteur expose une étude des surtensions produites par les décharges orageuses sur les lignes de transport d'énergie. Il a utilisé une modification de l'oscillographe cathodique de Dufour.*

*Après avoir souligné que l'importance économique de la protection des lignes contre les surtensions croît avec le développement des installations, il rappelle qu'après avoir vainement cherché à connaître la nature des surtensions en étudiant leurs effets sur les installations, on a eu recours à l'emploi de l'oscillographe cathodique de Dufour qui enregistre les variations d'une surtension d'une durée totale de quelques centaines de microsecondes, puis, à l'emploi du klydonographe, donnant à 20 pour cent près, la valeur maxima de la surtension et enfin au générateur de surtension qui permet de les reproduire sous une forme définie. Il décrit l'oscillographe tel qu'il a été modifié par lui pour éviter le voile de la plaque photographique et le générateur de surtensions de 3 millions et demi de volts, réalisé par la Compagnie Westinghouse. Il rappelle le processus de production des surtensions par coup de foudre direct et par libération brusque des charges induites statiquement sur la ligne. Il reproduit des courbes relevées au moment des décharges par éclairs et des courbes de surtensions de divers types enregistrées, avec ses appareils, tant en Suède qu'aux Etats-Unis sur les lignes ou sur les oscillateurs. Il conclut de son étude que le seul moyen de combattre les surtensions serait de reproduire au laboratoire toutes les surtensions observées au cours de l'exploitation.*

## 1. — LE DÉVELOPPEMENT DES GRANDS RÉSEAUX DE DISTRIBUTION ACCROÎT L'IMPORTANCE DES SURTENSIONS

Les coups de foudre sur des lignes de haute tension se sont toujours révélés comme des sources très graves de perturbations. L'importance de ce problème s'est accrue avec le développement général des transports aériens d'énergie électrique. La question se pose surtout aux Etats-Unis où l'électrification est très développée, et où il existe déjà beaucoup de lignes aériennes très longues.

Les pertes annuelles dues aux surtensions dues aux orages augmenteront encore avec le développement et les applications des lignes de transmission. En faisant de l'électricité un usage plus étendu, par exemple pour l'électrification des lignes de chemin de fer, une inter-

---

(1) Communication présentée à la Séance Mensuelle de la Société Française des Electriciens du 7 décembre 1929.

ruption due à la foudre aura des conséquences tout autres qu'à l'époque où le courant électrique ne recevait que des usages beaucoup moins étendus.

Le problème de la protection contre les coups de foudre entraîne donc des conséquences économiques très importantes. En regardant les efforts qui ont déjà été faits, il faut s'en souvenir pour solutionner le problème des coups de foudre.

## 2. — LE MANQUE DE MÉTHODES DE RECHERCHES CONVENABLES

Par suite de l'absence de méthodes convenables, les recherches des surtensions et, par conséquent, le développement des appareils de protection, ont subi, pendant longtemps, un arrêt.

C'est en vain que l'on a essayé de tirer des conclusions sur la nature des surtensions, de l'étude de leurs effets sur les installations électriques. Cette manière de traiter les problèmes peut être comparée à une observation superficielle d'une maladie humaine. Les conséquences se sont fait sentir dans l'organisation de systèmes de protection tout à fait inefficaces, et qui ont parfois introduit une nouvelle source de perturbation dans les installations.

Quelquefois, on a essayé d'adapter les surtensions aux systèmes de protection. Cette méthode, inefficace et dangereuse, a, heureusement, été laissée de côté, pour le moment.

Aujourd'hui, on traite la question des surtensions comme un problème de la technique scientifique, et ce n'est que par la solution de ce problème que l'on peut trouver les principes pour la construction des appareils de protection.

## 3. — LE DÉVELOPPEMENT DE LA TECHNIQUE DES MÉTHODES DE RECHERCHES

C'est surtout par le développement intense de l'électrophysique expérimentale et de la technique des pompes à vide que l'on a trouvé des moyens appropriés, pour la recherche des phénomènes de surtension. On a ainsi inventé trois appareils qui se complètent d'une manière évidente, et avec lesquels on a découvert des possibilités nouvelles de recherches. Ces trois appareils sont : l'oscillographe cathodique, le klydonographe, et le générateur de surtensions artificielles. L'oscillographe cathodique employé est conçu de telle façon, que les rayons cathodiques frappent une pellicule photographique située dans

l'intérieur du tube cathodique. Avec cet instrument il est possible d'enregistrer les variations d'une surtension qui ne dure que quelques centièmes d'un millionième de seconde.

C'est en France que fut inventé, par M. A. Dufour, le premier modèle de l'oscillographe cathodique. Son instrument était très perfectionné, dès le début, tandis que d'autres constructeurs ont perdu des années d'efforts, pour obtenir des résultats équivalents à ceux de M. Dufour.

Un oscillographe cathodique, avec ses accessoires, oscillateurs, kenotrons pour l'alimentation des pompes à vide, constitue un appareil assez compliqué.

Le Klydonographe, au contraire, est de construction et de manipulation plus simples. Il est constitué par une petite électrode isolée qui est pressée contre la pellicule sensibilisée d'une plaque photographique. Une impulsion de tension dépassant 2 kilovolts sur l'électrode produit une figure de Lichtenberg, dont le diamètre est proportionnel, avec une erreur maxima de vingt pour cent, à la tension de l'impulsion. Le klydonographe, qui fut inventé par J.-F. Peters <sup>(1)</sup>, de la Compagnie Westinghouse, à East-Pittsburg, constitue un appareil de contrôle des surtensions dans les lignes de transmission. Il a donné, aux Etats-Unis, des résultats très importants.

Au moyen des oscillographes cathodiques et des klydonographes, on peut mesurer directement les surtensions naturelles dans les lignes de transmission. Les dispositifs de générateurs de surtensions artificielles, au contraire, permettent de reproduire les surtensions sous une forme bien définie. Nous disposons ainsi des moyens de contrôler les appareils de protection, dans des conditions qui correspondent aux conditions naturelles des installations.

#### 4. — QUELQUES DIFFICULTÉS EXPÉRIMENTALES

a) *Les Klydonographes.* — La principale difficulté d'emploi du klydonographe consiste dans son impuissance à donner une forme exacte de la variation des surtensions avec le temps. D'une onde transitoire, causée par un coup de foudre, nous pouvons observer, par le klydonographe, l'amplitude maxima et le caractère positif, négatif ou oscillatoire. La durée totale et l'inclinaison du front sont des caractéristiques très importantes que ne peut donner le klydonographe. Pour

---

(1) J. F. Peters: the klydonograph. Electrical World, april 19, 1924. New-York.



cette raison, il faut compléter les klydonogrammes par une analyse plus exacte.

b) *Les oscillographes cathodiques.* — Le seul instrument pour une analyse exacte est l'oscillographe cathodique. Cet instrument donne des possibilités frappantes d'étudier les formes et les variations avec le temps des surtensions.

La difficulté la plus marquée dans l'emploi d'un oscillographe cathodique pour la recherche dans les lignes de transmissions, est de fixer le vrai moment d'exposition d'une surtension qui survient. On ne sait pas encore déterminer à l'avance ce moment. Dans un oscillographe cathodique avec dispositif ordinaire, bien que le temps d'exposition soit très court, le rayonnement, extraordinairement intense, du faisceau cathodique produit un voile noir sur toute la plaque photographique. Le voile se développe en un millième de seconde et il est, par conséquent, impossible d'enregistrer sur la plaque exposée aucun phénomène transitoire.

On a essayé de différentes méthodes pour supprimer le phénomène du voile. Par exemple, on cache le faisceau cathodique dans une poche située à l'intérieur de l'oscillographe. Le faisceau est déclenché par un relais consistant en un groupe de tubes électroniques influencés par la surtension. Malheureusement, les formes complexes des surtensions produisent des perturbations sur le circuit du relais.

En Suède, au laboratoire des surtensions de l'administration des Forces Hydrauliques de l'Etat, j'ai employé principalement une autre méthode ; j'ai utilisé le faisceau cathodique dans une fonction propre de relais. Le principe est représenté figure 1. Le faisceau passe de la cathode (1) par l'anode (2) à une électrode (3) située au centre du tube cathodique. Dans le tube, on dispose un double système de plaques de déviation (4) reliées diamétralement. Plus bas, est monté un diaphragme (5) dont le trou reste dans l'ombre portée par l'électrode (3). Ce diaphragme (5), en combinaison avec l'électrode (3) empêche la plaque photographique d'être voilée par le rayonnement cathodique. Au-dessous du diaphragme un second système de plaques de déviation (6) est monté et connecté à un circuit donnant une fré-

(1) Norinder : The Cathode Ray Oscillograph as Used in the study of Lighting and other Surges of Transmission Lines Presented at the Winter Convention, of the A. I. E. E., New-York N.Y. February 13-17, 1928.

(2) C. E. Fortescue, A. L. Atherton, J. H. Cox : Theoretical and Field Investigations of Lighting. Presented at the Winter Convention of the A. I. E. E. New-York N. Y. Jan. 28 Febr. 1. 1929.

quence sinusoïdale déterminée. Ce système de déviation est branché sur la ligne de transmission, par un système de condensateurs (8) monté comme potentiomètre.

Le fonctionnement du dispositif s'explique par la figure 1. Une surtension vient de la ligne en passant par le potentiomètre (8). La surtension agissant sur la première paire des plaques de déviation détermine, par exemple, une déviation du faisceau cathodique vers la gauche, et, par le second système des plaques de déviation, le faisceau est courbé à droite, en passant par le trou du diaphragme. On peut, en dimensionnant convenablement les systèmes de déviation, dévier le faisceau cathodique de manière, qu'il passe par le trou du diaphragme, pour une échelle de tensions très étendue. Les écarts du

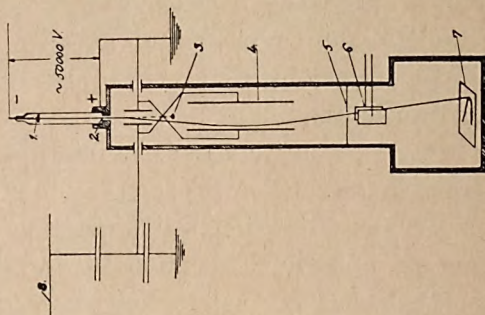


Fig. 1. — Oscillographe cathodique adapté à l'étude des surtensions.

zéro dûs à l'électrode (3), dans ce cas, ne dépassent pas 5 pour cent.

Le système de déviation (6) est branché sur un circuit oscillatoire d'une fréquence déterminée et inscrit les temps pendant la durée du phénomène. Avec ce dispositif d'oscillographe, nous avons opéré, pendant une demi-heure, avec la même pellicule photographique en position d'exposition. Il a été possible après un tel laps de temps d'exposition, d'enregistrer des surtensions d'une durée de quelques dizaines de micro secondes.

Pour les recherches de surtensions dans les lignes de transmission de l'Etat Suédois, nous avons employé trois oscillographes cathodiques, construits d'après les données ci-dessus. Une vue d'ensemble de l'appareillage oscillographique est donnée sur la figure 2.

c) *Les Générateurs de surtension.* — Pour produire les surtensions dans le laboratoire, la Compagnie Westinghouse a construit un appareil convenable, dans son laboratoire à haute fréquence, à Trafford,

U.S.A. Dans un circuit, on dispose une série de condensateurs  $C_1-C_{10}$ , de résistances  $R_1-R_{10}$ , et d'éclateurs 1-10, suivant le schéma de la figure 3.

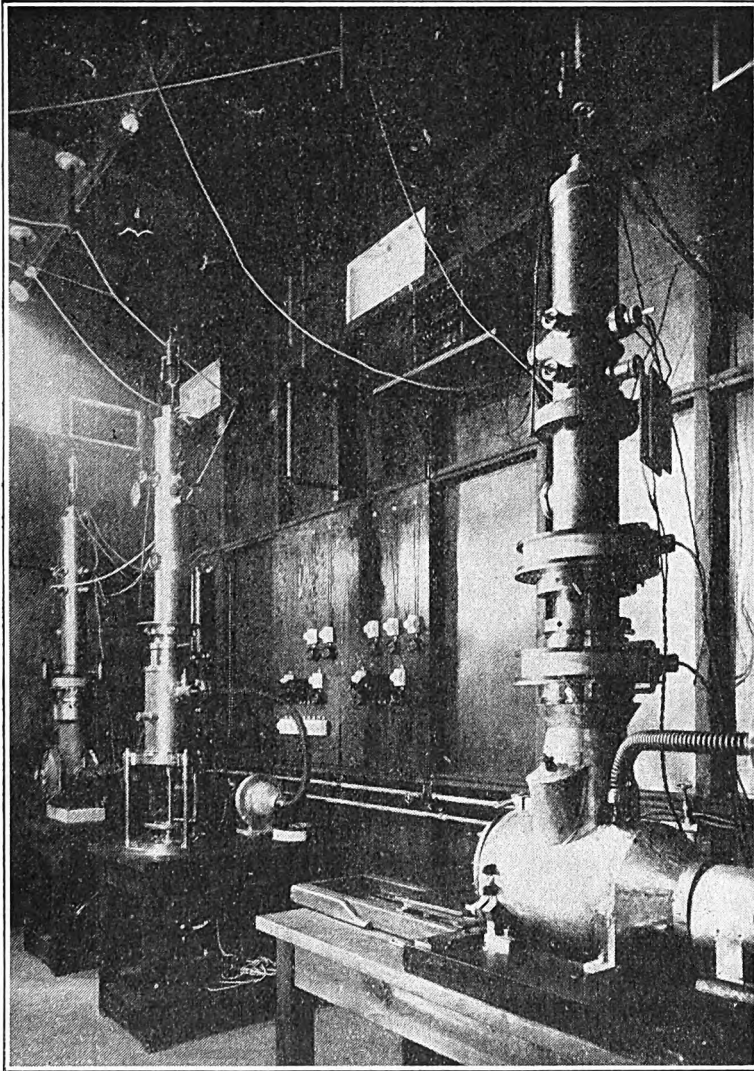


Fig. 2. — Installation de 3 oscillographes cathodiques pour l'étude des surtensions sur les lignes de l'Etat suédois.

Les condensateurs sont alimentés par un redresseur A de 100 kV, au travers des résistances  $R_1-R_{10}$  de l'ordre d'un megohm. Dans le groupe des éclateurs, on a réglé la distance 25 pour 100 plus bas,

pour l'éclateur 2, que pour les autres. En réglant la tension du redresseur, on détermine, dans l'éclateur 2, une étincelle et, par conséquent, une tension plus élevée sur ce groupe, que sur les autres. Cette surtension entraîne un éclatement général dans les groupes et,

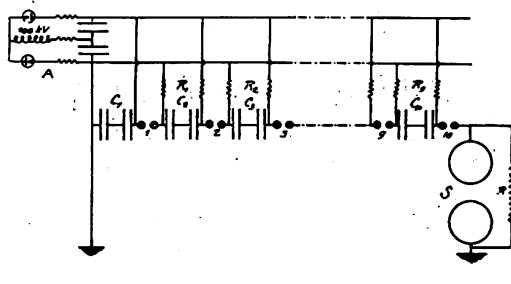


Fig. 3. — Schéma du générateur de surtensions de la Cie Westinghouse.

dans l'éclateur situé au bout du circuit, on obtient une tension dix fois plus grande que celle donnée par le redresseur.

Le retard des étincelles d'un groupe sur l'autre n'influence pas considérablement la tension résultante, comme on peut le voir, sur

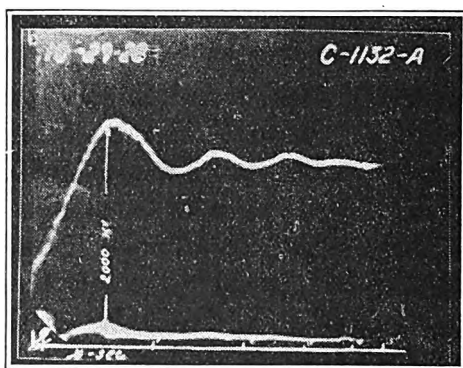


Fig. 4. — Oscillogrammes des surtensions données par le générateur Westinghouse.

la figure 4, qui montre une surtension de 2 000 kV dont le maximum est atteint au bout d'une demi micro-seconde.

##### 5. — DISPOSITIFS EXTÉRIEURS PERMETTANT DE CONNECTER LES OSCILLOGRAPHES ET LES KLYDONOGRAPHES AUX LIGNES A HAUTE TENSION

Un oscillographe cathodique, ou un klydonographe ne nécessite que de très petites quantités électriques, pour la charge des plaques de dé-



viation, et, pour cette raison, il est suffisant de monter l'oscillographe en série avec une capacité sur la ligne de transmission. On emploie, par exemple, une chaîne d'isolateurs.

Ces dispositifs extérieurs, dont on s'est servi à Uppsala, en connection avec les lignes de transmission, se voient sur la figure 5. Les chaînes d'isolateurs sont branchées, par une de leurs extrémités sur une ligne de transmission de 70 kV ou 20 kV respectivement. L'autre bout de la chaîne est mis à la terre, et, pour l'oscillographe, on s'est servi

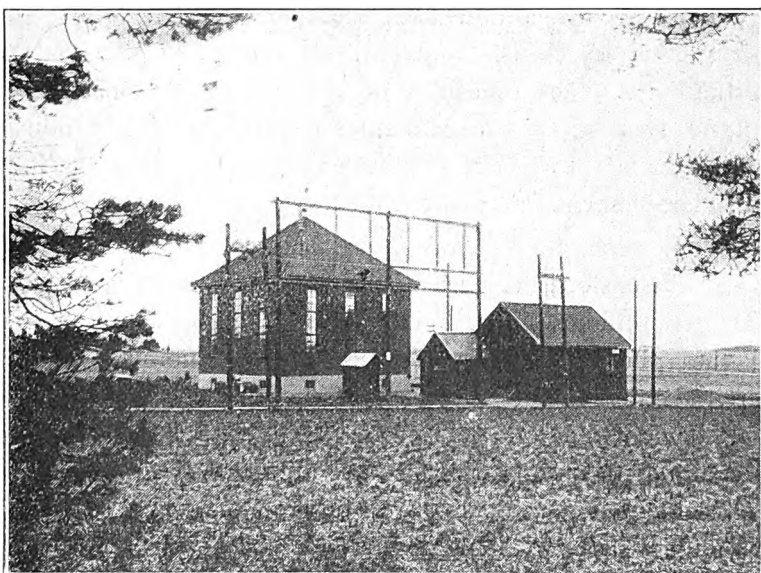


Fig. 5. — Montage des oscillographes sur les lignes (Uppsala).

de l'une des électrodes de la cloche suivante, en connectant cette électrode par un fil fin au système oscillographique. Dans ce circuit, on a intercalé une résistance non inductive, d'une valeur déterminée par le circuit. La résistance a pour but d'éteindre les oscillations propres du circuit de connection. Nous avons, dans quelques cas, employé des chaînes d'isolateurs suspendues dans l'intérieur du laboratoire, ou d'autres formes de potentiomètres. Pour le réglage et la réduction de la capacité du circuit, on intercale un condensateur dans ce circuit.

Dans nos recherches, nous avons quelquefois fait usage d'un circuit composé d'une antenne amortie, comme couplage aux lignes.

Il est nécessaire, quand on fait des observations sur une ligne sous tension normale, d'éliminer dans l'oscillographe l'influence de cette tension. L'élimination peut se faire à l'aide de l'électrode 3 (fig. 1). Il faut choisir cette électrode d'une largeur assez grande, et faire un réglage approprié au potentiomètre, de telle façon que le faisceau cathodique, en oscillant en même temps que la tension normale de la ligne, ne dépasse pas les limites de l'électrode. C'est seulement pour un surtension que le faisceau dépasse l'électrode et qu'il y a enregistrement.

On a besoin, dans certains cas, d'étudier les réflexions des ondes primaires dans les lignes. Souvent, en raison de l'amortissement, l'amplitude des ondes réfléchies ne dépasse pas la tension normale de la ligne. Dans ce cas, on peut intercaler une résistance non inductive shuntée avec la capacité et d'une valeur telle qu'elle n'influence pas considérablement le caractère de l'onde enregistrée.

En ce qui concerne l'opération expérimentale, les recherches directes des surtensions dans les lignes de transmission sont très difficiles. Dans l'oscillographe cathodique, par exemple, il faut opérer avec des plaques photographiques dans le vide. Le moindre défaut dans l'appareillage des pompes à vide peut causer des perturbations sérieuses. Cela devient d'autant plus nécessaire que les surtensions naturelles et les moments où on les reçoit dans une ligne de transmission sont rares et accidentels. Quelquefois, j'ai observé des orages violents situés tout près de la ligne, mais ne donnant pas de perturbations en forme de surtensions. Dans un autre cas, un seul coup de foudre donnera lieu à une surtension sérieuse et destructive.

#### 6. — QUELQUES CONDITIONS ÉLECTROPHYSIQUES SUR LA PRODUCTION DES SURTENSIONS

On admet généralement deux formes différentes pour la génération des surtensions d'origine atmosphérique dans une ligne de transmission : le coup de foudre direct sur la ligne, ou la décharge soudaine des charges induites par influence statique. Dans ce dernier cas, on suppose qu'un nuage électrisé, ayant donné à la ligne une charge contraire à la sienne, se décharge par un coup de foudre. La charge de la ligne, libérée plus ou moins vite, se propage par ondes, vers les deux extrémités de la ligne.

a) *Surtensions par coup de foudre direct sur la ligne.* — Je montrerai tout à l'heure comment se propage successivement le coup de foudre dans l'atmosphère. Pour un coup de foudre direct sur une ligne, le processus peut être représenté par le schéma de la figure 6. Dans ce cas, supposons que la décharge se propage du nuage situé verticalement au-dessus de la ligne. Elle commence par des décharges fractionnées dans l'intérieur du nuage, qui amènent une déformation générale des surfaces équipotentiellles qui, à leur tour, se propagent vers le point (2) au-dessous du nuage. A ce moment commence aussi, dans le champ devenu intense, une ionisation qui se

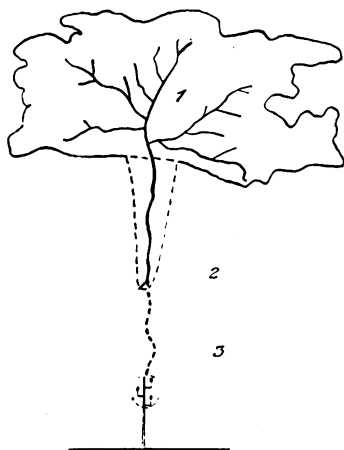


Fig. 6. — Processus de la surtension par coup de foudre direct.

propage par chocs avec une vitesse accélérée dans la dernière région (2-3 dans la figure). Il est évident que, pendant un moment très court, la foudre pénètre dans cette dernière région située entre le nuage électrisé et la ligne. Ce temps dépend de la résistance dans les branches de décharge du nuage et de la résistance du chemin de l'éclair. Si l'on admet que la vitesse de l'éclair dans l'atmosphère libre correspond à un dixième de la vitesse de la lumière, on a un temps de propagation de 3 micro-secondes, pour une distance de mille mètres. On peut estimer la longueur moyenne des éclairs à deux ou trois fois cette distance. Alors il n'est pas étonnant que des coups de foudre directs sur les lignes causent des surtensions inclinées sur l'axe du temps, pendant quelques micro-secondes.

b) *Surtensions par libération des charges induites.* — Quant aux surtensions causées par libération des charges induites, il faut considérer deux facteurs qui déterminent leur caractère : la distribution de la charge induite sur la ligne au moment de la décharge, et la vitesse de déplacement de la charge dans le chemin de l'éclair. En se reportant à la figure 7, on se rendra compte de la manière dont se produisent et se propagent les ondes. Dans la figure 7  $\varphi(x)$  représente la distribution de la charge induite sur la ligne au moment de la décharge, et c'est surtout pour ce phénomène que manquent les données expérimentales. Par conséquent, il ne vaut pas la peine de faire un calcul mathématique de la forme des surtensions en combinant

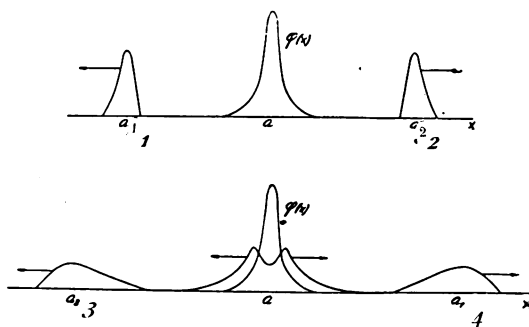


Fig. 7. — Processus de surtension par libération des charges induites.

les valeurs de  $\varphi(x)$  avec celles de la fonction de décharge. Par des méthodes graphiques, on peut facilement se rendre compte du caractère des surtensions. Une décharge extrêmement rapide donne lieu aux ondes de la forme 1 et 2, et une décharge plus lente, aux ondes de la forme 3 et 4 de la figure 7.

Il y a lieu de remarquer que, pour des régions étendues de l'atmosphère orageuse, la décharge varie assez lentement avec le temps. Très souvent, il en résulte des libérations des charges dans les lignes, d'autant plus ralenties que toute forme de surtension sera supprimée.

A cette occasion, il est à remarquer que dans la vingtième Conférence de Kelvin, M. C. G. Simpson a démontré que les effets des surtensions indirectes sont très faibles en comparaison des effets des surtensions produites par un coup de foudre direct.



# 7. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX RELEVÉS SUR LA VARIATION DE LA DÉCHARGE PAR ÉCLAIRS

Il est devenu possible d'étudier la décharge des éclairs à l'aide de l'oscillographe cathodique, et les résultats sont d'un très grand intérêt, surtout en ce qui concerne la question des surtensions.

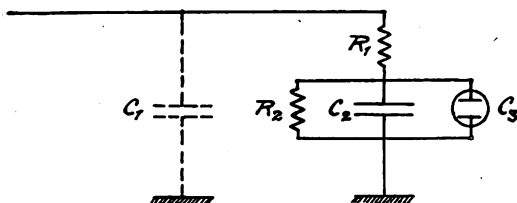


Fig. 8. — Schéma du circuit d'étude des variations de décharge par éclairs.

Le circuit que nous avons employé dans ce but est donné sur la figure 8. On s'est servi des collecteurs aperiodiques des antennes de radiotélégraphie. Les antennes étaient mises à la terre, par une résistance  $R_2$ , d'une valeur suffisante pour réduire à quelques micro-secondes

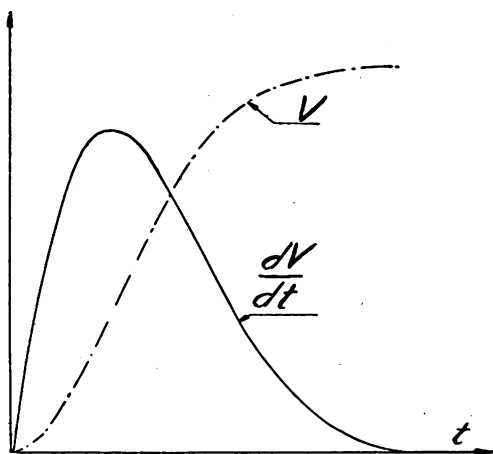


Fig. 9. — Variation du potentiel dans le circuit d'antenne.

des, la constante de temps de circuit. Pour réduire la tension, le condensateur  $C_2$ , de même capacité que l'antenne, était placé en dérivation avec  $R_2$ . Une résistance  $R_1$ , placée dans le circuit, éteignait ses oscillations propres. On peut supposer qu'une décharge entre deux

(1) Dr. G. C. Simpson : The Twentieth Kelvin Lecture. Journal of the Institution of Electrical Engineers. Vol. 67, n°. 395. London. Nov. 1929.

parties d'un nuage entraîne une variation de tension représentée par la courbe  $V$  dans la figure 9. La variation de tension dans le circuit de l'antenne se fait alors suivant la courbe  $\frac{dV}{dt}$  dans la même figure.

Par l'intégration des courbes enregistrées de  $\frac{dV}{dt}$  on peut faire une approximation de la variation, avec le temps, de  $V$  et, par conséquent, de la décharge.

J'ai donc marqué le caractère général de ces décharges qui se développent dans l'atmosphère par phases successives. La première phase

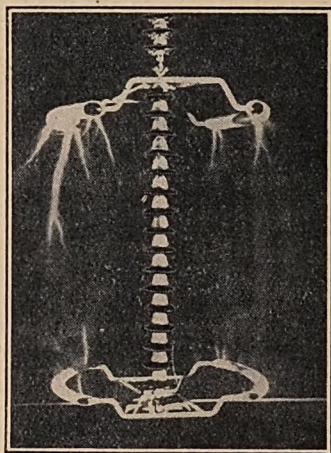


Fig. 10. — Décharge unipolaire à 3 500 000 V.

est caractérisée par des accumulations et déplacements lents des charges dans l'atmosphère orageuse. Leurs variations étant lentes, ces déplacements de charge ne se manifestent pas dans le circuit récepteur, grâce à la résistance  $R_2$ . L'accumulation accélérée de la charge dans quelques parties du nuage donne naissance à des champs locaux concentrés, qui déterminent, dans l'atmosphère des décharges fractionnées et stratifiées. Ces décharges fractionnées et filiformes doivent être senties dans l'antenne sous des conditions favorables de son orientation. Leur durée individuelle est extrêmement courte, de l'ordre de la micro-seconde. Elles peuvent se répéter suivant le même processus pendant 1 000 ou 2 000 micro-secondes. Ces décharges fractionnées produisent, dans l'atmosphère orageuse, une ionisation intense. C'est

dans la région ainsi ionisée que prennent naissance les éclairs fullgurants.

On peut observer un phénomène similaire dans le laboratoire, surtout si l'on se sert des décharges à longue distance. Dans la figure 10, j'ai reproduit une décharge unipolaire à 3 500 000 V qui a été prise dans les laboratoires à haute tension de la Compagnie Westinghouse à East Pittsburg <sup>(1)</sup>. La décharge fût, dans ce cas, photographiée par un système de lentilles de quartz, afin de rendre visibles les décharges filiformes et fractionnées. Les branches de la décharge, très marquées sur la plaque, sont entourées d'une quantité de branches filiformes. Dans la nature, on ne peut voir que difficile-

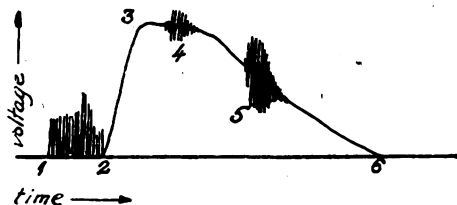


Fig. 11. — Décharge d'éclair relevée dans le système d'antennes.

ment de telles décharges, parce que les radiations qu'elles émettent sont très faibles ou ultraviolettes.

La figure 11 montre comment le mécanisme de la décharge affecte le système d'antenne, dans un cas normal. L'accroissement lent du champ produit des décharges fractionnées, qui sont reçues entre les points marqués 1 à 2 dans la figure 11. En 2 commence la décharge de l'éclair propre qui donne à l'antenne le maximum de charge, et par conséquent le maximum de tension au point 3. Aux points 4 et 5, on voit des décharges à haute fréquence superposées. Celles-ci peuvent être causées par quelques décharges fractionnées entre la branche principale et les branches secondaires de l'éclair.

(1) J. J. Torok : Surge Impulse Breakdown of Air. A. I. E. E. Quarterly Transaction. Vol. 47. April 1928.

### 8. — QUELQUES ENREGISTREMENTS CARACTÉRISTIQUES DES DÉCHARGES DES ÉCLAIRS

Dans les figures 12, 13, 14. j'ai fait reproduire quelques oscillogrammes caractéristiques que nous avons pris, ces deux derniers étés, à Uppsala et dont notre laboratoire s'est fait une spécialité.

Dans la figure 12, on observe quatre décharges différentes, très caractéristiques. La décharge marquée « A » donnait une charge positive à l'antenne, « B » au contraire, une double polarité, et « C » une charge négative. La décharge « A » avait une durée totale de 1 000 micro-secondes, avec des variations des plus brusques, oscillant pendant les premières 300 micro-secondes.

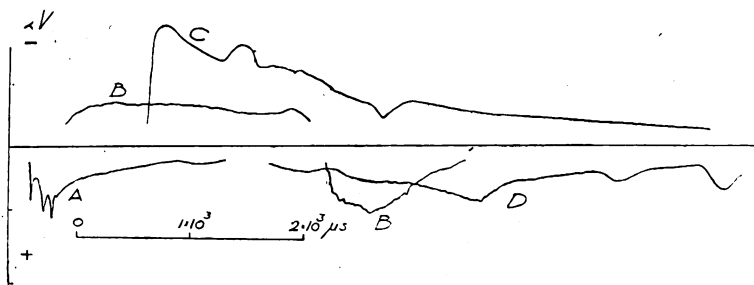


Fig. 12. — Décharges atmosphériques relevées sur antennes à Uppsala.

La décharge « B », qui avait une durée de 3 000 micro-secondes, était à une distance de 0,9 kilomètre du laboratoire, et était caractérisée par la superposition d'oscillations de haute fréquence.

Cette haute fréquence n'intervient pas dans le problème de la génération de surtensions dans les réseaux de distribution. Ces variations <sup>(1)</sup> donnent la solution d'un autre problème, très actuel et important, celui des perturbations atmosphériques sur les récepteurs de télégraphie sans fil. J'espère pouvoir traiter ce problème dans un autre rapport. En comparant la décharge « C » de la figure 12 avec « A » et « B » de la figure 13, on remarque que leurs caractéristiques se ressemblent. Elles ont, comme nous allons le voir, probablement été engendrées dans les mêmes régions de l'atmosphère orageuse. III

(1) H. Norinder. Some Electrophysical Condition Determining Lighting Surges. Journal of the Franklin Institute vol. 205, n° 6. June 1928.

faut remarquer que la décharge « B » de la figure 14 est précédée (2), pendant 1 000 micro-secondes, de nombreuses décharges fractionnées, avec des durées de l'ordre de micro-secondes.

De nos recherches sur la nature des décharges, il résulte que les

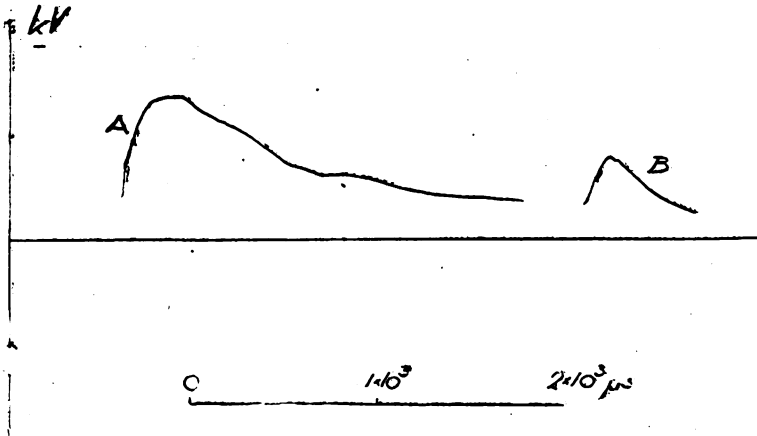


Fig. 13. — Décharges atmosphériques relevées sur antennes à Uppsala.

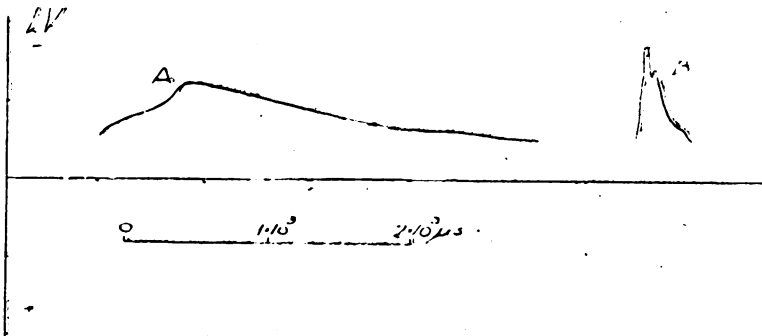


Fig. 14. — Décharges atmosphériques relevées sur antennes à Uppsala.

éclairs de divers types et la variation de décharge dans l'atmosphère se développent, très souvent, lentement. Ce fait explique aussi le caractère accidentel des surtensions dans les réseaux de distribution. J'ai remarqué, pendant mes recherches, que, quelquefois, des orages

(2). Ces oscillations superposées sont seulement visibles dans les oscillogrammes originaux.

violents dans le voisinage de la ligne, ne produisent aucune surtension. Dans des cas semblables, presque toutes les décharges ont montré des variations lentes et, sans doute, seulement quelques pour-cent du nombre de ces éclairs s'établissent entre la terre et les nuages. La plupart des éclairs s'établissent, dans l'atmosphère orageuse, entre différentes parties des nuages. Nous n'avons pu constater, définitivement, par des enregistrements, si de telles décharges produisent vraiment des surtensions sérieuses. Il faut, pour une telle étude, un appareillage plus complet que celui dont je dispose, et comportant plusieurs oscillographes, opérant simultanément dans différentes localités, sur le même orage.

Quant aux surtensions qui sont causées par un coup de foudre direct sur la ligne, nous avons pu faire quelques observations intéressantes. L'une des deux décharges C de la figure 12, ou A de la figure 13, sont produites par des coups de foudre entre nuages et terre. A l'une de ces deux décharges, un poteau sur une ligne de 3 kV fut foudroyé par un coup direct. La distance de ce poteau à l'antenne était de 2 kilomètres. La ligne à 3 kV était branchée sur un transformateur connecté sur une ligne voisine de 20 kV, où une surtension importante se produisit. La seconde des décharges mentionnées produisit aussi une surtension, dans une autre ligne à 20 kV, dans le voisinage. Nous n'avons pas eu l'occasion d'enregistrer ces surtensions avec l'oscillographe, parce que nous ne disposions, au moment de l'observation, que d'un seul instrument. Les deux surtensions se manifestaient par l'action des relais sélectifs du système de transmission.

#### 9. — LES ENREGISTREMENTS DIRECTS DES SURTENSIONS

Dans l'enregistrement des surtensions, on doit spécialement prendre en considération quelques traits intéressants, par exemple : l'amplitude maxima et l'inclinaison du front, ou le temps en micro-secondes nécessaire à la surtension pour atteindre sa valeur maxima. La durée totale et le temps que prendra la surtension, pour décroître jusqu'à la demi-valeur de la tension, sont aussi des caractéristiques très intéressantes.

La valeur maxima de la tension d'une surtension est déterminée ou limitée par l'isolation des lignes sur lesquelles se font les observations. Une ligne à 20 kV ne peut pas subir des surtensions de 60 à 80 kilovolts. Pour de telles valeurs, il se produit très facilement un court-

circuit sur la ligne avec des variations assez lentes de l'arc du court-circuit. La plaque photographique de l'oscillographe se voile et noircit et on ne peut découvrir que des traces faibles de surtension. L'idéal, pour atteindre les valeurs maxima, serait de faire des observations sur une ligne morte et isolée pour quelques millions de volts.

#### 10. — LE PREMIER ENREGISTREMENT D'UNE SURTENSION DANS UNE LIGNE DE TRANSMISSION

Le premier enregistrement qui ait été fait d'une surtension sur une ligne de transmission, est reproduit dans la figure 15. J'ai pris cet enregistrement pendant un orage, au cours de l'été 1925. L'oscillo-

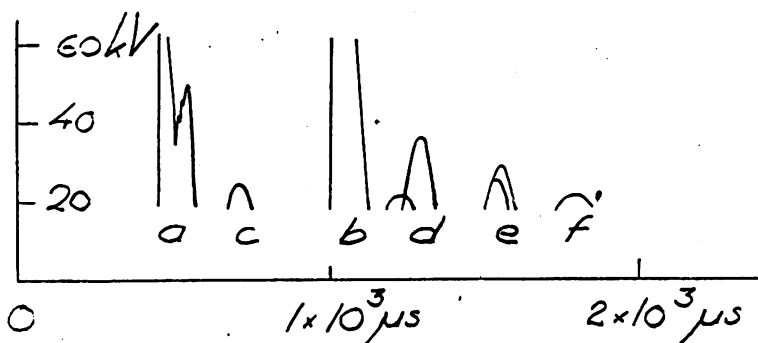


Fig. 15. — Enregistrement de surtensions atmosphériques : réflexions et amortissement (Uppsala).

graphe était connecté à une ligne de 20 kV, d'une longueur de 42 km, et avec la station oscillographique située à un des deux bouts de la ligne. Dans la figure 15, on voit deux surtensions primaires, que l'on a marquées a et b, respectivement. L'amplitude de la surtension dépassait trois fois la tension normale de la ligne mais, malgré cela, l'isolation de la ligne ne fut pas endommagée. Il est regrettable que l'amplitude, spécialement pour b, ait dépassé la région d'enregistrement de l'oscillographe. La comparaison des courbes a et c, montre un amortissement prononcé. La surtension après avoir parcouru deux fois toute la longueur de la ligne, était amortie de 60 pour 100. L'amortissement de b est aussi très prononcé, et montre deux réflexions marquées. Des surtensions avec des fronts peu inclinés et de fortes amplitudes provoquent un amorçage, par l'effet de couronne qui doit être très marqué.



Pendant la saison 1926, on n'eut pas d'occasions favorables pour observer des surtensions à Uppsala. Ce fut pendant l'été 1927 que l'on observa nombre de surtensions de différents types sur lesquelles j'ai déjà fait une publication <sup>(1)</sup>. Ces types sont schématisés dans la figure 16. La plupart des surtensions étaient, comme 1, 2 et 5, unipolaires. Le front doit s'incliner plus ou moins contre l'axe du temps. L'un des types atteignait la valeur maximum en quelques micro-secondes, et dans d'autres ce temps pourrait se compter en 50 micro-secondes. L'inclination du front reste néanmoins une question assez compliquée. Un front raide s'aplanit rapidement, et c'est seulement pour une surtension développée tout près du laboratoire que l'on trouvera un front très raide.

Pendant la saison 1928, on a fait des recherches, aux Etats-Unis, avec des oscillographes, suivant ma méthode. La Compagnie Westing-

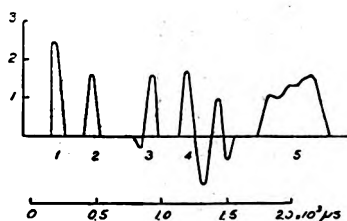


Fig. 16. — Types divers de surtensions enregistrées à Uppsala.

house, en collaboration avec la Compagnie de l'Aluminium de l'Amérique, ont installé deux laboratoires, dans ce but. Les oscillographes étaient mis en connexion avec une ligne de 154 kV, située à Tennessee, où des orages se manifestent très fréquemment.

Le premier enregistrement que l'on a pris sur cette ligne avait une durée totale de la surtension de 80 micro-secondes, et son allure générale était tout à fait concordante avec les formes que j'avais observées, moi-même, en Suède. Cette surtension à front raide atteignit une valeur maximum de 750 kV. En plaçant les deux laboratoires dans une région de l'Amérique où l'on avait observé de très fréquents et violents orages, on avait espéré pouvoir prendre plusieurs enre-

(1) Norinder : The Cathode Ray Oscillograph as used in the study of Lightning and other surge of Transmission Lines. Presented at the winter Convention of the A.I.E.E. : New-Yor Ny Febr. 13-17, 1928.



gistements pendant la première année, ce qui ne s'est pas produit. Au point de vue fonctionnement des instruments, les expériences de la première installation ont donné des résultats tellement favorables que la Compagnie Westinghouse s'est, en collaboration avec différentes compagnies de distribution d'électricité, décidée à établir trois nouvelles stations d'observation. Par conséquent, au cours de l'été 1929, on a opéré, en Amérique, avec cinq stations, et les résultats obtenus ont été satisfaisants. Les recherches faites, au laboratoire d'Uppsala, sur les lignes de transmission de l'Etat de Suède, ont

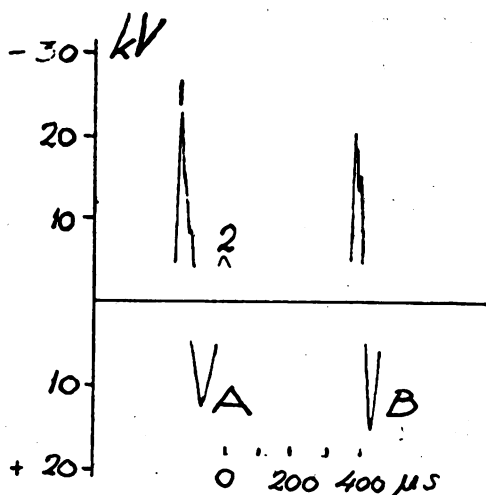


Fig. 17. — Surtension sur ligne de 43 km. à 20 kV; traces de réflexion d'onde (2).

été effectuées, pendant l'été dernier, avec deux appareils oscillographes, fonctionnant dans le même laboratoire.

Dans la figure 17 sont représentés deux enregistrements de surtensions A et B qui ont été observés pendant un orage, sur la même ligne de transmission de 20 kV et d'une longueur de 42 km. Les surtensions ont été enregistrées, à l'oscillographe, sur un film photographique, à une échelle telle que un millimètre de film correspondait à 24 micro-secondes. L'avantage d'une telle échelle est que l'on reçoit la variation des surtensions dans ses traits généraux. Par contre, les détails des variations avec le temps n'ont pu être observés.

Les deux surtensions sont de polarité double avec même caractère des variations, d'où l'on peut conclure qu'elles ont été engendrées

dans la même partie du nuage orageux. La durée totale des surtensions était de 100 micro-secondes, valeur que nous avons également observée, quelquefois, auparavant.

Pour la surtension A de la figure 17, on voit du côté négatif des traces du sommet (2) de l'onde revenant de l'autre bout de la ligne.

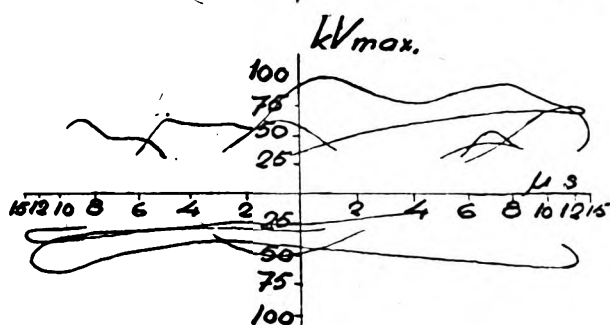


Fig. 18. — Enregistrement de surtension produite par un oscillateur à tension sinusoïdale.

Pour un trajet de 84 km, l'amortissement est donc de 75 pour 100.

Quelques enregistrements avec une autre échelle du temps sont reproduits dans les figures 18, 19 et 20. Nous nous sommes servis, comme échelle du temps, dans ces enregistrements, de l'oscillateur à une fréquence déterminée et à variation sinusoïdale. Même pour une

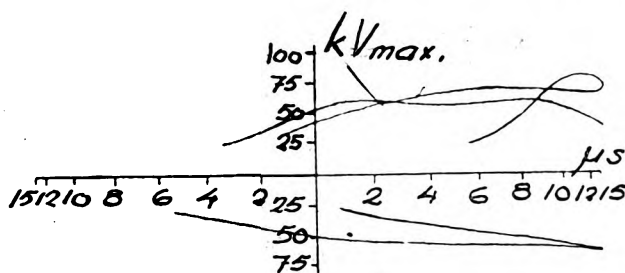


Fig. 19. — Enregistrement de surtension produite par un oscillateur à tension sinusoïdale.

personne non-initiée, les courbes des figures 18-20 sont caractéristiques. Mais il est, en tous les cas, facile, connaissant la fréquence, de transcrire les courbes en coordonnées cartésiennes. Les enregistrements les plus intéressants sont reconstruits, de cette façon, dans la figure 21.

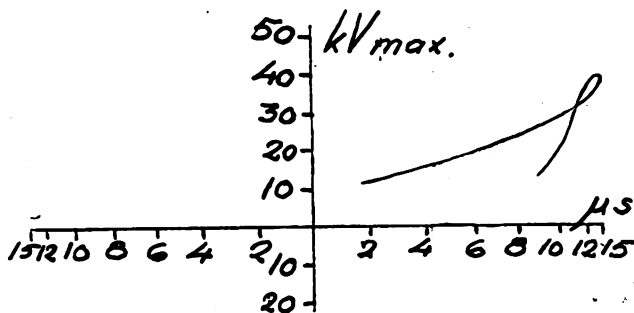


Fig. 20. — Enregistrement de surtension produite par un oscillateur à tension sinusoïdale.

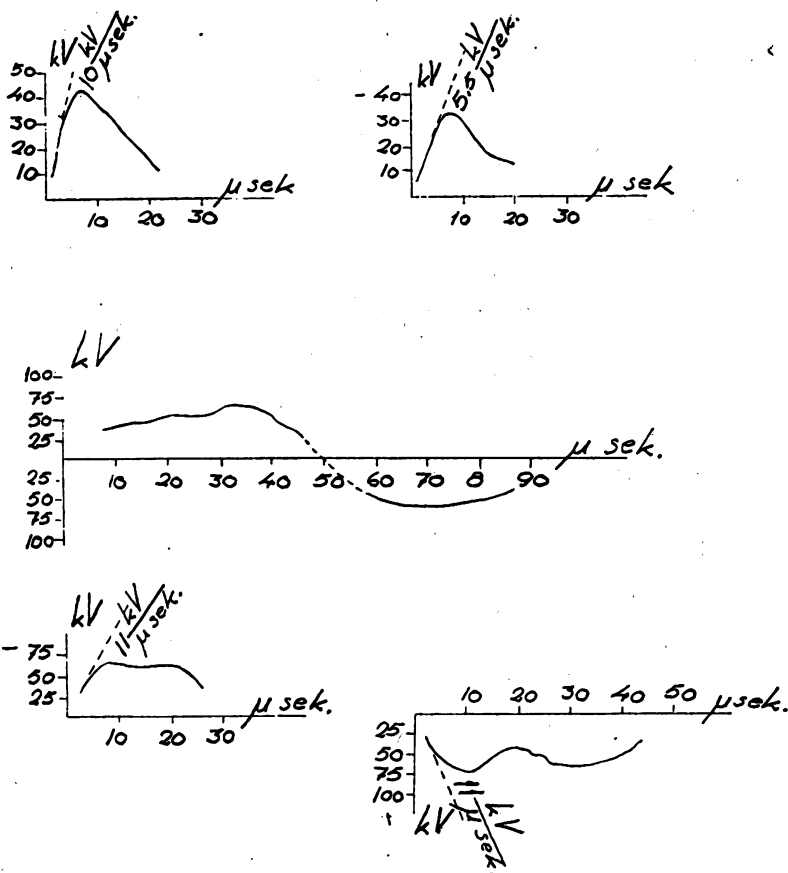


Fig. 21. — Courbes précédents reportées en coordonnées cartésiennes.

De ces figures, il résulte que la polarité prédominante est négative. On voit que, dans la plupart des cas, les valeurs maxima sont atteintes pendant 3 à 10 micro-secondes. Pour quelques-unes, la valeur maxima est atteinte pendant un temps plus long. Les augmentations les plus intenses sont de 37,5 et 20 kV par micro-seconde. C'est par

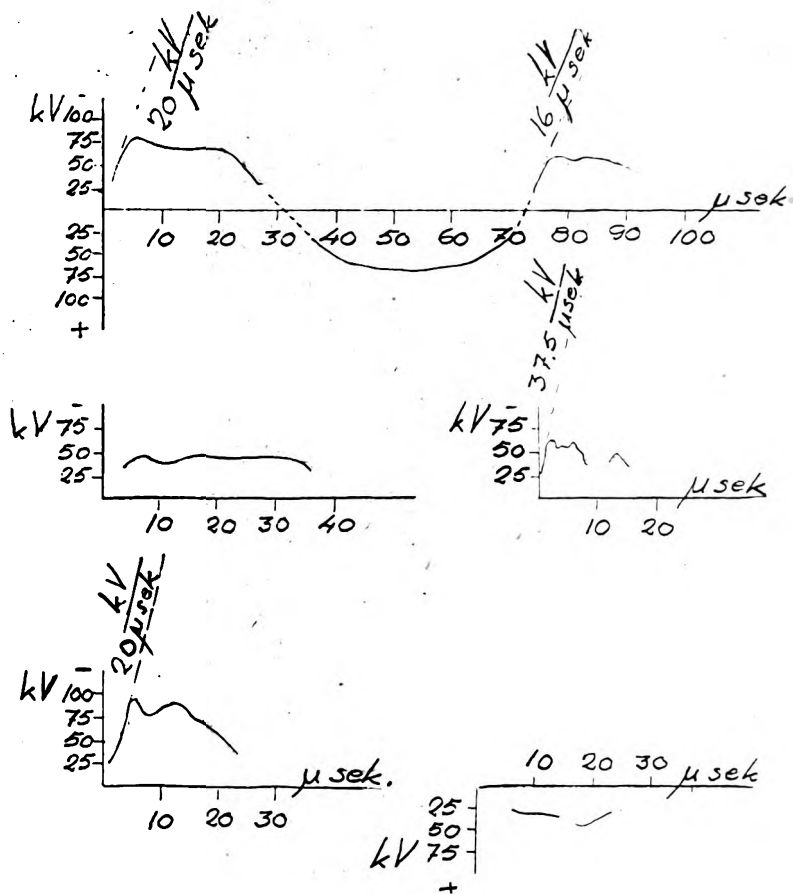


Fig. 22. — Courbes précédentes reportées en coordonnées cartésiennes.

hasard que l'on n'a pas observé une inclinaison plus raide dans l'élévation des surtensions. Par un coup de foudre direct sur la ligne, tout près du point d'observation, on devrait, par exemple, s'attendre à une élévation plus prononcée. La durée totale des surtensions varie de 20 à 100 micro-secondes.

De tous nos enregistrements de surtensions, il résulte que l'on ne peut guère tirer une conclusion générale au point de vue d'une espèce déterminée de surtensions standardisées. Pour la production d'un tel type, les données extérieures nous ont fait défaut. Les orages eux-mêmes ne sont pas des phénomènes d'une régularité suffisante pour produire des surtensions standardisées.

Par contre, il serait intéressant de pouvoir se rendre compte, si les surtensions enregistrées sont engendrées par coup de foudre direct ou par influence. Pour le moment, il n'est pas possible de donner une réponse à ce problème, il faut faire des recherches plus étendues. Par contre, les surtensions à front raide sont toutes engendrées par coups de foudre directs. Elles sont, dans ce cas, très souvent détachées à des ramifications d'un coup de foudre entre la terre et le nuage.

### CONCLUSIONS

De nos recherches, il résulte que la question des surtensions peut être étudiée par des méthodes expérimentales exactes. Par conséquent, on pourrait, à l'avenir, facilement démasquer tous les secrets des surtensions dans les lignes de transmission. Par contre, et comme je l'ai déjà signalé, il n'est pas possible, d'après les résultats obtenus, de classer les surtensions sous un même type normal. Comme résultat général, on pourrait obtenir un groupe de surtensions de différentes formes. Il faut, par conséquent, compter avec une graduation prononcée dans les formes des surtensions, graduations que nous pouvons observer facilement dans les phénomènes primaires, c'est-à-dire dans les coups de foudre.

Pour éliminer les surtensions, il semble donc que le seul moyen logique et possible serait de faire des recherches rationnelles, permettant de reproduire et de contrôler les surtensions observées dans nos laboratoires et dans les installations électriques ou dans les lignes de transmissions. Le résultat de ces recherches nous donnerait le moyen de nous rendre compte si un système de protection, ou une installation électrique convenablement conçue, pourraient résister aux surtensions.

# RAPPORTS PRÉSENTÉS A L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE

du Samedi 5 Avril 1930

---

## **Rapport du Comité d'Administration**

Messieurs,

*Développement de notre Société.* — La progression continue de notre Société s'est encore affirmée cette année : 339 nouveaux membres ont été admis dont 28 Sociétés ou Compagnies.

Parmi celles-ci, plusieurs ont bien voulu verser une cotisation supérieure au montant réglementaire. Aux Sociétés, ainsi qu'aux membres individuels, qui veulent imiter ce geste généreux, nous offrons de faire sur leur demande un service supplémentaire du Bulletin par chaque centaine de francs versée en sus de la cotisation.

Vous trouverez, ci-après, l'énumération des travaux de la Société au cours de ses Séances publiques, des séances de ses six sections, des réunions d'automne en commun avec d'autres Sociétés.

Les rapports annuels de nos deux grands groupes régionaux vous mettront au courant de leur très féconde activité.

Nous tenons à rappeler que nos séances de sections, de plus en plus fréquentées sont ouvertes à tous ceux de nos membres qui en font la demande, et qu'elles s'empressent d'accueillir toute personne étrangère à la Société ayant un sujet intéressant à exposer.

C'est surtout grâce à ces travaux de nos Sections que nous voyons augmenter le nombre et l'ampleur des sujets traités dans notre Bulletin.

On sait qu'il n'insère, en principe, que des communications inédites. Malgré cette restriction, nous sommes presque débordés par les demandes d'insertion. Nous prions donc instamment les auteurs de vouloir bien nous aider en réduisant l'étendue de leurs articles. Ceci nous évitera de recourir à la méthode américaine qui consiste à ne publier que des extraits.

## ACTIVITÉ TECHNIQUE DE LA SOCIÉTÉ

*Bibliothèque*

Un service de documentation vient d'être organisé à la bibliothèque dans le but de donner aux membres de la Société le plus de facilités possible pour profiter des nombreux périodiques, des douze mille volumes et des 30 000 fiches réunis à Malakoff.

Ce service comporte des traductions en toutes langues, des renseignements de documentation, des reproductions photographiques, en noir sur blanc, d'articles, de revues ou d'extraits de livres, des groupements d'articles se rapportant à un sujet donné ou à un auteur déterminé, et enfin, à titre d'essai, des prêts de livres.

*Séances publiques mensuelles*

Les sujets ci-après ont été traités dans nos séances publiques mensuelles :

Vues modernes en électrostatique. Production du froid par l'effet Peltier. Les bois employés en électrotechnique. Les forces hydrauliques de l'Afrique équatoriale française. Les centrales thermiques américaines. Usines hydroélectriques et lignes à 220 000 V aux Etats-Unis. Stations et sous-station automates. Surtensions des orages dans les grands réseaux. Sondage, détection et signalisation en mer par les ultra-sons dirigés. Fabrication des redresseurs à vapeur de mercure. Oscillographe cathodique à développement synchronisé. Nouvel oscillographe Blondel. Potentiomètre-phasemètre. Traction par accumulateurs. Le développement de l'électricité et l'évolution des conceptions scientifiques.

*Travaux des Sections*

Nos six sections ont étudié les sujets suivants dans leurs séances mensuelles :

1<sup>o</sup> Section. — Emploi des machines frigorifiques dans les centrales électriques ; alternateurs auto-exciteurs ; utilisation des marées ; accouplement magnétique sans frottement ; flux et répartition du champ au voisinage d'un point ; moteurs Dassenoy ; nouveau type de moteur asynchrone compensé ; moteurs à cage folle ; phénomènes transitoires dans les machines polyphasées ; détermination des caractéris-

tiques des transformateurs par la méthode de court-circuit ; les marques de bornes des transformateurs et des machines ; fonctionnement des stations centrales avec moteurs à gaz ; chute de tension entre balais et bagues.

2<sup>e</sup> Section. — Emploi des tubes à néon au balisage des champs d'aviation ; éclairage des studios ; influence de la lumière électrique sur la végétation ; l'éclairage public par l'électricité en France ; chauffage par machine frigorifique ; vitesse de convection des gaz dans les lampes à atmosphère gazeuse ; nouvelles lampes au néon à basse tension ; calcul des filaments des lampes électriques ; valeurs minima d'éclairement à adopter dans les divers locaux.

3<sup>e</sup> Section. — Electrolyseurs à diaphragmes métalliques Pechkranz ; extraction électrolytique de l'iode ; éclateurs de four à haute fréquence ; théorie de l'accumulateur au plomb ; traitement électrolytique des déchets de bronze ; recuits partiels par induction ; accumulateur léger Pouchain ; procédés de nickelage rapide ; propriétés du graphite ; ampèremètres pour grandes intensités.

4<sup>e</sup> Section. — Les distances à observer dans les installations haute tension ; détermination des courants de court-circuit ; limite d'emploi des couteaux de sectionnement pour la rupture de la marche en parallèle de transformateurs ; emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution ; exploitation des sous-stations extérieures ; protection des canalisations souterraines contre la corrosion ; limitation des court-circuits dans les réseaux haute tension ; la foudre et les lignes électriques ; éclateurs court-circuiteurs ; relais d'impédance ; limite de la tension non dangereuse des courants électriques ; appareils de protection contre les surtensions ; essais des isolateurs ; ampèremètres de barre.

5<sup>e</sup> Section. — L'unité de fréquence ; télégraphie à fréquences acoustiques ; remise à l'heure des horloges par lignes téléphoniques ; utilisation du télétype dans les liaisons téléphoniques ; mesure du déséquilibre des câbles téléphoniques ; filtrage des courants redressés ; correction du synchronisme dans le système Baudot-Verdan ; le cinquantenaire du téléphone ; reproducteurs électriques de phonographes ; système de téléphonie automatique de la Compagnie des téléphones



Thomson-Houston ; courroies transporteuses à sélection multiple ; étude du bruit des machines ; mécascope Vatinet-Durand ; la navigation physique ; chronomètre électrique enregistreur pour tables téléphoniques ; remarques sur les récents multiplicateurs statiques de haute fréquence.

6° Section. — Définition de la capacité ; clauses techniques pour condensateurs ; détermination des propriétés magnétiques des tôles aux faibles inductions en courant alternatif ; potentiomètre-phase-mètre ; système d'unités universel ; formule pour le calcul rapide des résistances ohmiques ; appareil analyseur des harmoniques Mader-Ott ; l'oscillographe Blondel nouveau modèle ; ampèremètre de barre ; appareil « Telect » de transmission électrique à distance ; nouvel appareil d'auscultation d'organes en mouvement, le « mécascope ».

#### *Semaine d'octobre*

Modèles mécaniques en électrotechnique ; embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil ; nouveau type de moteur asynchrone compensé ; emploi des machines frigorifiques dans les centrales électriques ; utilisation rationnelle de la puissance du vent ; les centrales thermiques américaines ;

L'éclairage par les tubes luminescents ; croissance des végétaux en lumière artificielle ; optique des surfaces diffusantes ; éclairage anti-éblouissant des voitures automobiles.

L'accumulateur au plomb ; le redresseur « Rectox » ; le redresseur à anode colloïdale ; soudure à l'arc électrique et soudure à l'hydrogène atomique.

Limitation des court-circuits dans les réseaux haute-tension ; emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution ; postes extérieurs ; le freinage électrique des trains sur pentes.

L'évolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques ; alliages à haute perméabilité ; la liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées ; transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes ; filtrage des courants redressés ; synchronisme des transmissions Baudot-Verdan.

La puissance réactive ; définition des capacités ; vues modernes sur l'électrostatique ; dispositifs de condensateurs et inductances analo-

gues à celles de Boucherot ; diagrammes circulaires du dispositif Boucherot et dispositifs similaires ; projet de clauses techniques pour les condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance ; de l'universalité nécessaire du système métrique absolu.

#### *Séances communes*

Nous avons tenu 4 séances communes avec la Société des Ingénieurs civils de France au cours desquelles nous avons entendu les intéressantes conférences de MM. Maurice de Broglie, Delon, Fourneau, Parodi et Rieunier.

*Réception à Paris et voyage dans les Pyrénées de l'Institution of Electrical Engineers.* — Nous avons eu le plaisir de recevoir du 12 au 22 juin les membres de l'Institution of Electrical Engineers venus au nombre d'une centaine. Grâce à la C.P.D.E., au Groupement des Secteurs de la Région parisienne, à la Compagnie d'Orléans, à la Compagnie du Midi et aux nombreuses Sociétés qui ont accueilli nos amis anglais, la réception à Paris et le voyage dans les Pyrénées furent pleinement réussis.

#### *Visites*

De nombreux membres ont répondu aux aimables invitations qui ont été faites par la C.P.D.E. pour visiter la nouvelle usine d'Issy-les-Moulineaux et les sous-stations de Vendôme et de la Nation, par la Cie Electromécanique qui nous a ouvert ses Ateliers du Bourget, par le Docteur Saidman qui nous a montré ses installations de radiations ultra-violettes, par les Etablissements Gaiffe-Gallot-Pilon qui ont réalisé une protection absolue contre les dangers des rayons X.

Notre ancien président, M. Eschwège, a bien voulu convier au mois d'octobre les membres de notre groupe Sud-Ouest à inaugurer la très intéressante usine de la Société Forclum à Périgueux.

#### *Représentations aux Congrès*

Notre Société a été représentée à divers Congrès :

Association française pour l'avancement des Sciences, au Havre du 25 au 30 juillet 1929 par M. Blondin.

Congrès des Ingénieurs électriciens Tchécoslovaques en juin 1929 par M. Cacheux.

Congrès de Tokio en octobre-novembre 1929 par MM. Cuvillier, Pahin, Pernod.

Cinquantenaire de l'Elektrotechnischer Verein en janvier 1930 par M. Boucherot.

A cette occasion MM P. Janet et Boucherot ont été nommés membres correspondants de cette Compagnie.

Notre Société sera en outre représentée aux fêtes du cinquantenaire de l'American Society of Mechanical Engineers en avril 1930 par MM. Claude, Kennelly et Sharp.

*Membres décédés.* — Depuis mars 1929 la mort nous a enlevé 15 de nos collègues, MM. Abadie, Archat, Barès, Candie, Doignon, Ducastel-Blandin, Lesage, Lieb, Parsons, Rateau, Salomons, Sébert, Semenza, Tournayre, Zetter.

Nous renouvelons à leurs familles nos plus sincères condoléances.

*Distinctions honorifiques.* — Depuis avril 1929 les distinctions suivantes ont été attribuées dans l'ordre de la Légion d'honneur à des Membres de notre Société :

*Commandeurs* : M. Mariage.

*Officiers* : MM. Schuhler, Saurel.

*Chevaliers* : MM. Delachaux, Langlois-Berthelot, Lecorbeiller, de Massias-de Bonne, de Raemy, Sarrat, Viard.

En outre, le prix Montefiore pour 1929 a été partagé entre plusieurs lauréats parmi lesquels notre Président M. Parodi et notre collègue M. Pestarini.

Dans sa séance du 27 novembre 1929, notre Comité a décidé d'attribuer pour 1930 la Médaille triennale Mascart à M. Paul Janet.

Dans son Assemblée générale du 4 janvier 1930, notre Société a nommé M. P. Janet Président d'honneur.

Nous pouvons conclure de ce rapide exposé que notre Société est en pleine voie de développement et que son activité s'étend de plus en plus, tant en France qu'à l'Etranger.

---

## Rapport de la Commission des Comptes

---

Messieurs,

Dans votre Assemblée du 5 janvier 1929, vous avez bien voulu nous confier le soin d'examiner les comptes de votre Société pour l'Exercice 1929 ; nous avons procédé à cet examen et venons vous faire part des observations qu'il nous a suggérées.

L'Exploitation des différents services s'est poursuivie dans les conditions qui avaient été prévues au moment du vote du Budget. Les dépenses s'annonçaient comme devant dépasser les recettes, elles les ont dépassées et les mesures prises pour remédier à l'insuffisance des ressources attendues n'ont pu rétablir entièrement la situation. Finalement les comptes de l'Exercice accusent une différence en moins de 46 731,96 francs.

Malgré cela le Bilan, grâce à des versements exceptionnels, se présente avec une augmentation d'Actif ; cette circonstance est due principalement à ce que les travaux de construction de l'Ecole étant terminés, le montant total des subventions accordées pour cette opération et dont une partie avait figuré jusqu'à complet emploi au Passif de la Société, a été considéré comme lui étant définitivement acquis et est entré comme tel dans les écritures.

Dans le détail voici les points qui nous semblent devoir vous être signalés :

### A. — LABORATOIRE

#### 1° *Exploitation*

*Recettes.* — Les essais ont pris cette année un développement exceptionnel, d'autre part le tarif a été relevé de 12 0/0 ; dans ces conditions les redevances ont dépassé 449 000 francs, somme sensiblement supérieure au montant des Exercices précédents.

L'Administration des P.T.T. a demandé pour les Unités et Etalons électriques des études spéciales qui se continueront chaque année et pour lesquelles elle a ouvert au Laboratoire Central d'Electricité un crédit de 50 000 francs qui sera inscrit au Budget de l'Etat.

*Dépenses. — Personnel :* Les dépenses de Personnel ont été plus considérables que par le passé à cause de l'augmentation du nombre des agents, à cause surtout du relèvement des salaires. Fait à signaler : Les dépenses de Personnel qui correspondaient autrefois à peu près exactement au produit des redevances se sont trouvées en 1929 sensiblement moindres.

*Entretien des Bâtiments :* La Ville de Paris a exigé le ravalement de l'immeuble rue de Staël, d'où une dépense imprévue de 15 000 francs, et dépassement sur le chapitre.

*Amortissement :* L'Amortissement des immobilisations se fait à une allure malheureusement lente.

Les autres chapitres n'appellent pas d'observation.

La différence entre les Recettes et les Dépenses industrielles : 154 243,22 francs, est plus que couverte par les subventions dans lesquelles les subventions sur la taxe d'apprentissage entrent pour 190 526,50 francs.

## 2° Bilan

Au cours de l'année, l'installation dans les bureaux abandonnés par l'Ecole rue de Staël s'est poursuivie ; elle est à peu près achevée ; de même pour l'organisation de la Salle de Haute Tension.

D'une année à l'autre, dans l'ensemble, le Bilan a peu varié.

## B. — ECOLE

### 1° Exploitation

Pour la première fois depuis longtemps les comptes de l'Ecole présentent un déficit, c'était d'ailleurs chose prévue ; grâce à certaines libéralités exceptionnelles ce déficit est moindre que celui que l'on craignait (84 093,99 francs au lieu de 126 000 francs).

Voici les points sur lesquels des indications sont nécessaires :

*Recettes. — Les frais d'études* se trouvent, malgré le relèvement du taux, sensiblement inférieurs à ceux de l'Exercice précédent : 891 044,40 francs au lieu de 933 632 francs. Il y a là un avertissement à retenir.

*Radioélectricité :* 137 355 francs, diminution également sur l'Exercice précédent : 165 711,75 francs. Le nombre d'élèves a diminué.

*Souscriptions* : Le total en atteint 37 000 francs, supérieur aux inscriptions au Budget grâce au Chemin de fer Métropolitain qui a versé 25 000 francs, à la Chambre de Commerce qui a donné 10 000 francs et à MM. de Rothschild 2 000 francs.

*Intérêts des Fonds placés* : Appréciable augmentation tenant à ce que nous avons, les travaux de Malakoff étant achevés, pu placer en valeurs de bourse une partie des sommes que, pour les besoins de la trésorerie, nous maintenions en compte à vue dans les banques.

*Immeuble Malakoff* : Revenu de la Maison à l'angle de la rue Edgar-Quinet à Malakoff que nous avons acquise au cours de l'année.

*Dépenses. — Personnel* : Le relèvement des traitements voté après l'approbation du Budget avait nécessité l'autorisation par le Bureau, d'une dépense supplémentaire de 22 600 francs. Cette somme ajoutée à l'allocation primitive de 430 000 francs s'est trouvée dépassée : 486 157,40 francs, parce qu'une ventilation nouvelle des honoraires des professeurs a été faite et qu'une grande partie de ceux-ci a été reportée au chapitre Personnel dégageant d'autant les chapitres particuliers sur lesquels ils étaient autrefois imputés (Conférences notamment).

*Atelier* : Le crédit de 1929 en augmentation sur celui de 1928, en augmentation lui aussi sur celui de 1927, n'a pas encore été suffisant.

*Conférences* : Economie de 30 000 francs provenant du virement indiqué plus haut. Le tarif a été porté depuis novembre dernier à 400 francs.

*Sorbonne* : Les dépenses de la Sorbonne : 19 892 francs excèdent les recettes (14 825 francs) ; nous avons lieu d'espérer pour 1930 une contribution intéressante à nos charges qui réduira notre déficit.

*Radioélectricité* : Ce chapitre ne donne qu'une plus-value de recettes insignifiante.

*L'Amortissement* : reste avec une allocation très réduite et qui n'affecte rien aux constructions.

*Déplacements et autos* : Dépassement de dépenses de 8 000 francs environ qui s'explique en partie par un report de dépense de l'Exercice précédent (prime d'assurance) pour lequel il n'avait pas été porté de provision.

La différence entre les Recettes et les Dépenses s'établit comme il est indiqué plus haut à 84 093,99 francs.

## 2° Bilan

ACTIF. — Il y a peu de choses à signaler au Bilan.

Les *immeubles* se sont augmentés par l'acquisition de la maison rue Edgar-Quinet à Malakoff : 160 000 francs. Cet immeuble a été payé avec les fonds des subventions versées pour la Reconstruction de l'Ecole.

Le *Portefeuille*, grâce aux cours en Bourse a pris une valeur sensiblement plus élevée que celle qu'il avait au 31 décembre 1928, il a d'autre part bénéficié des acquisitions nouvelles qu'a permises la fin de l'emploi aux travaux de construction des sommes que nous avions réservées pour notre fonds de roulement.

PASSIF. — Rien à dire de *Avances* ni des *Créanciers*.

*Amortissement du Portefeuille* : Pour maintenir dans nos écritures, au prix d'achat, les valeurs mobilières, nous avons continué à porter à la Réserve Profits sur valeurs mobilières, tous les excédents dus à l'augmentation des cours en Bourse.

*Amortissement Matériel et Constructions* : Il ne s'élève encore qu'à 253 987,71 francs ; somme bien insignifiante relativement à la valeur des immobilisations.

*Réserve souscriptions* : Nous avons reçu pour l'année 1930 :  
sur la taxe d'apprentissage ..... 6 931,80 francs  
et de l'Union des Syndicats pour l'Ecole ..... 30 230,30 francs

---

|                                         |                      |
|-----------------------------------------|----------------------|
| L'Actif s'établit en définitive à ..... | 16 519 521,23 francs |
| Le Passif à .....                       | 7 777 261,56 francs  |

---

laissant un solde de ..... 8 742 259,67 francs  
à porter au crédit de la Société Française des Electriciens.

## C. — SOCIÉTÉ SAVANTE

## 1° Exploitation

Le Budget voté pour la Société Savante prévoyait un déficit de 14 345 francs ; à ce déficit est venu s'ajouter le montant des dépenses autorisées dans la suite pour le relèvement des traitements du Personnel : 24 000 francs. Il semblait donc devoir atteindre 38 345 francs.

Devant cette situation la décision avait été prise de porter le taux des Cotisations normales à 100 francs ; de ce chef un supplément de Recettes de 60 000 francs était attendu.

La situation, après ces différentes mesures, devait donc présenter un excédent de Recettes de  $60\,000 - 38\,345 = 21\,655$  francs. Les comptes arrêtés au 31 décembre se liquident avec un solde créditeur de 15 138,30 francs.

Dans le détail, voici comment s'établit la comparaison des chapitres :

*Recettes :*

|                          |         |         |
|--------------------------|---------|---------|
| Prévision Budget .....   | 145 000 |         |
| Supplément attendu ..... | 60 000  | 205 000 |
| Encaissements .....      |         | 203 549 |

*Dépenses :*

|                          |           |  |
|--------------------------|-----------|--|
| Bulletin prévision ..... | 83 000    |  |
| Paievements .....        | 91 714,15 |  |

---

Excédent ..... 8 714,15

Cet excédent se justifie par la dépense d'impression de la plaquette Ampère, décidée par le Bureau en cours d'Exercice.

|                                                                                  |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Personnel .....                                                                  | 54 623,50 |           |
|                                                                                  | 12 000    | 66 623,50 |
| contre une prévision primitive de .....                                          | 45 000    |           |
| à laquelle s'est ajouté le crédit supplémen-<br>taire rappelé plus haut de ..... | 24 000    | 69 000    |

Sur les autres chapitres il n'y a pas d'observation à présenter.

#### D. — SERVICES GÉNÉRAUX

Le Budget voté pour ce Service prévoyait un dépassement de dépenses de 15.755 francs ; un supplément de Crédit de 6 000 francs pour le Personnel, autorisé par le Bureau, a porté ce dépassement à 21 755 francs ; les comptes arrêtés au 31 décembre 1929 fixent à 23 950,05 francs le déficit réel.

Il n'y a dans le détail que des modifications insignifiantes à signaler.

*Recettes.* — Les intérêts des fonds placés sont un peu supérieurs à la prévision.



*Dépenses.* — Les *cotisations* payées à des Comités divers passent de 8 200 francs à 9 200 francs par suite du relèvement du taux des cotisations.

La *Bibliothèque* a demandé 2 000 francs de plus que ce qu'il lui avait été alloué.

Le *Personnel* 3 000 francs de plus que les allocations primitives augmentées du Crédit supplémentaire autorisé après coup.

### 1° Bilan

*ACTIF.* — Au cours de l'Exercice, par suite des hauts cours pratiqués en Bourse, notre portefeuille a pris une plus-value importante ; pour maintenir dans nos écritures les valeurs aux prix d'achat, nous avons inscrit au Passif une réserve égale à la plus-value constatée au 31 décembre.

Notre fonds social a reçu, comme chaque année, le produit des Cotisations libérées et le dixième des Revenus.

Rien à dire des autres parties.

Nous avons fait figurer à notre Actif les actions de la Société Nouvelle avec le prix d'émission de 1 000 francs.

Les legs et fondations se sont accrus des augmentations versées par M. Hueber-Regnault pour faire une Bourse plus importante, et de la Bourse Hauvette Michelin : 120 000 francs.

*Passif.* — Notre Réserve générale s'est légèrement accrue.

Enfin nous avons constitué un chapitre spécial pour les Subventions applicables à 1930 qui nous ont été versées par l'Union des Syndicats de l'Electricité.

Si l'on compare les deux Bilans 1928 et 1929, on constate en faveur de ce dernier un excédent d'actif de 1 300 000 francs environ constitué par 400 000 francs attribués aux Actions de la Société Nouvelle, par l'augmentation des Bourses, enfin par l'acquisition du terrain de Malakoff 160 000 francs, payé à l'aide des subventions ; c'est en réalité à ce dernier élément qu'il convient de ramener les plus-values, les autres étant de nature variable et sans garantie de durée, ou constituant un dépôt incessible.

Telles sont les constatations que nous avons à faire devant vous.

Nous n'en tirerons pas de conclusions alarmantes, mais simplement matière à réflexions sérieuses.

Ne disposant normalement que de recettes desquelles il semble bien que nous ayons obtenu tout ce qu'elles pouvaient donner, nous nous trouvons obligés de subir des dépenses sans cesse grandissantes et le besoin de concours extérieurs se fait de plus en plus sentir de façon impérieuse. Nous avons adressé un appel extrêmement pressant à l'Industrie et à l'Etat. L'Industrie a répondu en nous donnant sur la taxe d'apprentissage des subventions importantes, en outre à l'appel de l'Union des Syndicats de l'Electricité, des versements nous sont parvenus qui doivent se reproduire plusieurs années. Quant à l'Etat nous croyons pouvoir compter sur son aide qui se traduira par une inscription de Crédit au Budget.

Nous ne pouvons douter que ces ressources, indispensables à l'existence des Etablissements que nous avons organisés, nous suivent dans l'avenir.

*Les Commissaires aux Comptes,*

Signé : SCHWARBERG, GIROUSSE, DE VALBREUZE.

## COMPTE D'EXPLOITATION DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

### EXERCICE 1929

#### RÉSUMÉ DE L'EXPLOITATION

|                         | RECETTES     | DÉPENSES     | EXCÉDENT    |             |
|-------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|                         |              |              | DE RECETTES | DE DÉPENSES |
| Laboratoire .....       | 716.633 45   | 670.460 17   | 46.173 28   |             |
| Ecole .....             | 1.332.948 20 | 1.417.042 19 |             | 84.093 99   |
| Société Savante ..      | 211.289 75   | 196.150 95   | 15.138 80   |             |
| Services généraux ..... | 171.558 55   | 195.508 60   |             | 23.950 05   |
|                         | 2 432.429 95 | 2.479.161 91 | 61.312 08   | 108 044 04  |

Excédent de dépenses : 46.731 96

# EXPLOITATION 1929

## Laboratoire Central d'Électricité

| Budget 1929 | Recettes                                   | Depenses                                                              | Budget 1929 |
|-------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| 7.903 »     | Arrages de la rente .....                  | Personnel .....                                                       | 366.254 40  |
| 300.000 »   | Redevances pour essais et étalonnements .. | Frais d'Administration :                                              |             |
| 50.000 »    | Subvention des P.T.T. ....                 | Frais de Bureau, correspondance et divers .....                       | 13.171 12   |
| Mémoire     | Prélèvement sur avances Syndicat Radio ..  | Chauffage .....                                                       | 50.672 »    |
| do          | Dons en nature .....                       | Eau, Electricité .....                                                | 9.349 05    |
| do          | Recettes diverses .....                    | Téléphone .....                                                       | 2.581 35    |
|             |                                            | Comité d'éclairage .....                                              | 400 »       |
|             |                                            | Opérations et essais taxés :                                          |             |
|             |                                            | Moteurs .....                                                         | 42.383 60   |
| 97.747 »    | Déficit industriel .....                   | Produits .....                                                        | 40.511 80   |
|             | couvert par :                              | Atelier .....                                                         | 2.861 »     |
|             | Souscriptions pour .....                   | Déplacement du Personnel .....                                        | 16.539 65   |
|             | celles-ci s'éle-                           | Depenses pour clients ...                                             | 1.084 »     |
|             | vant à .....                               | Loyers, Impôts, Assurances .....                                      | 8.832 30    |
|             | savoir :                                   | Entretien des bâtiments .....                                         | 27.451 45   |
| 10.000 »    | sousc. ordin. ..                           | Entretien des machines et appareils .....                             | 7.738 90    |
| 150.000 »   | sousc. taxe ..                             | Etudes pour unités et étalons électriques ..                          | 50.043 75   |
|             | réduite à ....                             | Recherches pour le Syndicat de Radio .....                            | 7.070 »     |
|             | laissent un reliquat de...                 | Expériences et recherches .....                                       | 515 80      |
|             |                                            | Amortissements :                                                      |             |
|             |                                            | Matériel 5% .....                                                     | 35.000 »    |
|             |                                            | Constructions 2 1/2 % .....                                           | 18.000 »    |
|             |                                            | Solde créditeur faisant emploi de la totalité des souscriptions ..... | 670.460 17  |
| 615.650 »   |                                            |                                                                       | 46.173 28   |
|             |                                            |                                                                       | 716.633 45  |

### Immobilisations

| En dehors des opérations ci-dessus qui concernent l'Exploitation |                                      |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Nous avons reçu (voir au bilan) :                                | Nous avons dépensé (voir au bilan) : |
| Solde de la subvention, Travaux Publics.....                     | Pour Salle Haute Tension.....        |
| Et autres.....                                                   | Pour acquisition de matériel.....    |
| Prélevé sur fonds généraux de la Société.....                    | Pour transformation des locaux.....  |
|                                                                  | Et nous avons en Dons en nature..... |
|                                                                  | 39.865 05                            |
|                                                                  | 48.792 70                            |
|                                                                  | 214.940 70                           |
|                                                                  | 502 15                               |

# **École Supérieure d'Électricité**

| Budget 1929        | <i>Recettes</i>                                                                   | <i>Dépenses</i>                               | Budget 1929         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| 845.000 »          | Redevances des élèves et auditeurs (Frais d'études, section normale, Sorbonne)... | Personnel.....                                | 486.157 40          |
| 35.000 »           | Fournitures diverses.....                                                         | Frais d'Administration :                      |                     |
| 75 000 »           | Autographies.....                                                                 | Frais de bureau, corresp. et divers.....      | 18.655 43           |
|                    | Radio-télégraphie :                                                               | Chauffage.....                                | 75.538 70           |
| 470.000 »          | Frais d'études.....                                                               | Eau et éclairage.....                         | 12.925 47           |
| 20.000 »           | Section d'éclairage.....                                                          | Téléphone.....                                | 6.029 95            |
| 5.000 »            | Souscriptions.....                                                                | Travaux des élèves :                          |                     |
| 50.000 »           | Intérêts des fonds placés...                                                      | Moteurs.....                                  | 38.506 37           |
| 2.000 »            | Subvention de la ville de Paris.....                                              | Produits et dépenses diverses.....            | 13.105 10           |
|                    | Immeuble Malakoff.....                                                            | Atelier.....                                  | 37.635 05           |
|                    | Recettes diverses.....                                                            | Conférences, projets, examens, etc.....       | 144.915 »           |
|                    |                                                                                   | Fournitures diverses.....                     | 46.045 35           |
|                    |                                                                                   | Autographies.....                             | 103.300 05          |
|                    |                                                                                   | Sorbonne.....                                 | 19.893 »            |
|                    |                                                                                   | Section d'éclairage.....                      | 28.813 50           |
|                    |                                                                                   | Radio-télégraphie.....                        | 135.620 95          |
|                    |                                                                                   | Impôts, assurances.....                       | 18.343 44           |
|                    |                                                                                   | Entretien des bâtiments.....                  | 15.178 01           |
|                    |                                                                                   | Entretien des machines et appareils.....      | 24.619 55           |
|                    |                                                                                   | Versement du 10 <sup>e</sup> des revenus..... | 7.100 30            |
|                    |                                                                                   | Reconstruction école.....                     | 76.261 77           |
|                    |                                                                                   | Amortissement :                               |                     |
|                    |                                                                                   | Matériel.....                                 | 40.000 »            |
|                    |                                                                                   | Construction.....                             | 68.377 80           |
|                    |                                                                                   | Déplacements et autos.....                    |                     |
| 126.000 »          | Solde débiteur de l'exploitation.....                                             |                                               |                     |
| <u>1.298.000 »</u> |                                                                                   |                                               | <u>1.417.042 14</u> |
|                    |                                                                                   |                                               | <u>1.298.000 »</u>  |

## *Immobilisations*

|                                                                                                                                   |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| En dehors des opérations ci-dessus qui concernent l'Exploitation, l'Ecole a acheté l'immeuble de la rue Edgar-Quinet.             | 160.000 »              |
| En outre elle a versé, pour être remises à la Société Nouvelle, les annuités de remboursement des Avances de la Construction..... | 12.897 14 (Voir bilan) |

# Société Française des Électriciens.

## A. — Société savante. — Exploitation 1929.

| Budget 1929 | Recettes                                                                                                  |            | Dépenses                                                   | Budget 1929 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------|-------------|
| 145.000 »   | Cotisations de l'exercice.....                                                                            | 203.549 »  | Frais de publication : Bulletin affranchi et annuaire..... | 91.714 45   |
| 4.655 »     | Prélèvement sur intérêts pour part contributive des cotisations libérées dans la dépense du Bulletin..... | 5.000 »    | Semaine d'octobre.....                                     | 6.613 55    |
| 2.500 »     | Recettes bulletin.....                                                                                    | 2.740 75   | Frais de Réunions :<br>Location de salles.....             | 2.716 25    |
| 14.345 »    | Solde débiteur.....                                                                                       |            | Frais d'administration.....                                | 17.316 »    |
|             |                                                                                                           |            | Frais de correspondance.....                               | 9.297 50    |
|             |                                                                                                           |            | Personnel.....                                             | 54.623 50   |
|             |                                                                                                           |            | Frais spéciaux du délégué général.....                     | 42.000 »    |
|             |                                                                                                           |            | Cotisations irrécouvrables.....                            | 1.870 »     |
| 166.500 »   |                                                                                                           | 211.289 75 | Solde créditeur.....                                       | 196.180 95  |
|             |                                                                                                           |            |                                                            | 15.138 80   |
|             |                                                                                                           |            |                                                            | 211.289 75  |
|             |                                                                                                           |            |                                                            | 166.500 »   |

## B. — Services généraux. — Exploitation 1929.

|           |                                             |            |                                                             |            |           |
|-----------|---------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|------------|-----------|
| 65.000 »  | Intérêts des fonds placés.....              | 67.036 14  | Prélèvement sur intérêts pour Société Savante.....          | 5.000 »    | 4.655 »   |
| 19.000 »  | Intérêts des legs et fondations.....        | 37.842 97  | Bourses et fondations :<br>payées.....                      | 24.769 05/ |           |
| 70.000 »  | Versement de l'école pour la reconstruction | 64.567 74  | à payer.....                                                | 13.073 92  |           |
| 4.000 »   | Intérêts des avances.....                   | 895 »      | Cotisations à Comités divers.....                           | 9.200 »    | 19.000 »  |
| 500 »     | Souscriptions.....                          | 1.216 70   | Versement à la Société Nouvelle : Intérêts des avances..... | 64.567 74  | 8.200 »   |
|           | Recettes diverses.....                      | 171.558 55 | Entretien de la Bibliothèque.....                           | 21.000 75  | 70.000 »  |
| 15.755 »  | Solde débiteur.....                         | 23.950 05  | Frais de représentation.....                                | 2.511 75   | 19.000 »  |
|           |                                             |            | Frais d'Administration.....                                 | 8.659 04   | 5.000 »   |
|           |                                             |            | Frais de correspondance.....                                | 1.407 35   | 7.500 »   |
|           |                                             |            | Personnel.....                                              | 42.919 »   | 2.500 »   |
|           |                                             |            | Pensions.....                                               | 2.400 »    | 33.000 »  |
| 171.255 » |                                             | 195.508 60 |                                                             | 195.508 60 | 2.400 »   |
|           |                                             |            |                                                             |            | 171.255 » |

## A et B. — Immobilisations (Voir au bilan)

|                                                                                                                                                      |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Les Services ont reçu au cours de l'année pour versement du 1/10 <sup>e</sup> du revenu de l'Ecole.....                                              | 7.100 30     |
| Les Services ont reçu pour cotisations libérées à porter au fonds social.....                                                                        | 7.717 85     |
| La Société a inscrit à son actif :<br>La Bourse Hauvette.....                                                                                        | 120.048 »    |
| et les souscriptions versées pour l'achat des actions de la Société Nouvelle.....                                                                    | 4.076.942 89 |
| La Société a cédé des actions de la Société Nouvelle pour.....                                                                                       | 35.000 »     |
| Il a été versé au fonds social la retenue statutaire 1/10 <sup>e</sup> + le versement du 10 <sup>e</sup> de l'Ecole et les cotisations libérées..... | 13.803 90    |
|                                                                                                                                                      | 7.717 85     |

# EXERCICE 1929

## BILAN DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

| Résultats<br>1928 | ACTIF                                           | 1. 2. et 3. parties | PASSIF                                          | Résultats<br>1928 |
|-------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|-------------------|
| 48.355 20         | A. Bibliothèque et mobilier.....                | 48.355 20           | H. Avances.....                                 | 370.903 60        |
| 10.161.546 13     | B. Immeubles et constructions.....              | 10.452.718 63       | I. Créanciers :                                 |                   |
| 5.116.304 46      | C. Matériel.....                                | 5.181.773 68        | Extérieurs.....                                 | 7.246.828 81      |
| 2.150.979 37      | D. Portefeuille.....                            | 3.655.293 01        | Services intérieurs de<br>la S.E.F. entre eux.. | 8.203.774 56      |
| 2.023.577 18      | E. Caisse et Banques.....                       | 1.827.619 64        | J. Amortissements :                             | 15.450.603 37     |
|                   | F. Débiteurs divers :                           |                     | Portefeuille.....                               | 424.260 44        |
|                   | Extérieurs.....                                 | 572.298 64          | Constructions.....                              | 457.469 71        |
|                   | Services intérieurs de<br>la S.F.E. entre eux.. | 8.203.774 56        | Matériel.....                                   | 916.302 50        |
|                   | Sté Nouvelle annulés<br>de remboursement..      | 12.897 14           | K. Réserves.....                                | 831.510 07        |
| 6.135.331 66      |                                                 | 8.788.970 34        | Capital.....                                    | 12.296.119 66     |
| 25.636.094 00     |                                                 | 29.954.790 50       |                                                 | 29.954.790 50     |
|                   |                                                 |                     |                                                 | 25.636.094 »      |

# BILAN 1929

## 1<sup>re</sup> PARTIE. — Laboratoire.

| Résultats<br>1928 | <b>ACTIF</b>                         |              | <b>PASSIF</b>                             |            | Résultats<br>1928 |
|-------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|
| 2.975 40          | <b>A. — Bibliothèque et Mobilier</b> |              | <b>I. — Créditeurs</b>                    |            | 81.619 95         |
|                   | Bibliothèque                         | 2.975 40     | <b>J. — Amortissements</b>                |            |                   |
|                   | <b>B. — Constructions</b>            |              | <b>Matériel :</b>                         |            |                   |
| 534.739 63        | Constructions                        | 529.462 63   | Antérieurs                                | 123.567 20 |                   |
| 103.768 20        | Canalisations                        | 2.177 »      | 1929                                      | 35.000 »   | 123.567 20        |
|                   | Transformation des locaux de l'école | 234 910 70   | <b>Constructions :</b>                    |            |                   |
|                   | <b>C. — Instruments et Matériel</b>  |              | Antérieurs                                | 61 487 15  |                   |
| 684.732 89        | Antérieurs                           | 684 732 89   | 1929                                      | 18.000 »   | 61.487 15         |
|                   | 1929. Acquisitions                   | 49.204 85    | <b>K. — Réserves</b>                      |            |                   |
|                   |                                      | 704.027 74   | <b>Réserve pour salle haute tension :</b> |            |                   |
|                   | Moins ventes                         | 25 »         | Subvention Travaux publics                | 465 541 »  |                   |
| 290.339 32        | Salle haute tension :                | 704.002 74   | et autres                                 | 330.204 37 | 175.201 68        |
|                   | Antérieurs                           | 290.339 38   | Moins dépenses                            |            | 49.093 13         |
|                   | 1929                                 | 39.865 05    | Souscriptions en réserve                  |            | 175.467 46        |
| 48.553.71         | <b>E. — Caisse et Banque</b>         |              | Souscriptions sur taxe d'apprentissage    |            | 190.526 50        |
| 640 »             | Caisse                               | 32 803 26    | 1930                                      |            |                   |
|                   | Cautionnements                       | 640 »        | Souscriptions Union 1930                  | 1 200 »    |                   |
|                   | <b>F. — Débiteurs</b>                |              | Consignation Syndicat Radioélectrique,    |            |                   |
| 506.302 47        | Extérieurs                           | 140.136 15   | solde                                     | 14.955 »   | 22.025 »          |
| 2.169.051 62      | Intérieurs                           | 289.590 26   |                                           | 695.726 52 | 656.403 38        |
|                   |                                      | 2.267.032 51 |                                           |            |                   |

|                     |                                                          |
|---------------------|----------------------------------------------------------|
| Actif               | 2.267.032 51                                             |
| Passif              | 695 726 52                                               |
| Excédent de l'actif | 1.571.305 99 dû à la Société Française des Electriciens. |

2<sup>e</sup> PARTIE. — Ecole.

| Résultats<br>1928 | ACTIF                             | PASSIF                                      | Résultats<br>1928 |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|
|                   | B. — Immeubles                    | H. — Avance                                 |                   |
| 1.287.406 »       | Terrain Malakoff .....            | Redev. Elèves 30 .....                      | 238.125 »         |
| 7.997.855 30      | Constructions.....                | Autographies 30 .....                       | 47.606 55         |
| 4.105.056 50      | C. — Instruments et Matériel..... | Redev. Radio 30 .....                       | 168.488 35        |
|                   |                                   | Section Ecl. 30.....                        | 75 »              |
|                   | D. — Portefeuille                 | I. — Créanciers                             |                   |
| 316.875 »         | Fonds de réserve.....             | Extérieurs .....                            | 101.820 62        |
| 478.505 50        | Fonds disponibles .....           | Intérieurs.....                             | 6.680.000 »       |
|                   | E. — Caisse et Banques            | J. — Profits sur valeurs mobilières.....    | 212.317 88        |
| 1.591 06          | Caisse.....                       | Amortissement du matériel et des            |                   |
| 143 35            | Cautionnement .....               | Constructions                               |                   |
|                   | F. — Débiteurs                    | Constructions .....                         | 77.982 56         |
| 215.959 50        | Intérieurs.....                   | Matériel .....                              | 176.005 15        |
|                   | Extérieurs .....                  | K. — Réserve                                |                   |
|                   |                                   | Réserve Radio.....                          | 37.678 35         |
|                   |                                   | Souscription sur taxe d'apprentissage 1930. | 6.931 80          |
|                   |                                   | Souscription Union .....                    | 30.230 30         |
| 14.403.392 21     |                                   |                                             | 7.777.261 56      |
|                   |                                   |                                             | 5.737.038 55      |

|                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| Actif.....               | 16.519.521 23     |
| Passif .....             | 7.777.261 56      |
| Excédent de l'actif..... | 8.742.259 67      |
|                          | dûs à la S. F. E. |



[illegible]

RAPPORT ANNUEL  
SUR LE LABORATOIRE CENTRAL  
ET L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ

par M. Paul JANET

*Directeur*

---

**I. — Laboratoire central d'électricité**

*Personnel* : L'effectif du personnel technique du Laboratoire en 1929 a été au maximum de dix-sept personnes, à savoir :

le Directeur, le Sous-Directeur, le Sous-Directeur adjoint, sept ingénieurs, trois préparateurs, trois électriciens et un mécanicien.

Déplorons encore une fois le manque de stabilité du personnel technique : sur les sept ingénieurs mentionnés plus haut, quatre n'avaient pas au 31 décembre plus de six mois de présence au Laboratoire.

Si on veut prendre en considération que même pour un élève sortant de l'Ecole Supérieure d'Electricité, plusieurs mois de travail sont nécessaires avant qu'on puisse le considérer comme au courant du service dont il est chargé, on se rendra compte de la difficulté que nous éprouvons à assurer la bonne et surtout la rapide exécution des essais qui nous sont confiés. Cette situation ne pourra se modifier que par l'amélioration des traitements du personnel.

*Matériel* : La plupart des appareils achetés en 1929 l'ont été pour le service des recherches relatives aux unités électriques pour lequel nous recevons une subvention du Ministère des Postes et des Télégraphes.

C'est ainsi que nous avons acquis des boîtes de résistances spéciales pour courant alternatif, un potentiomètre, un pont double, un galvanomètre de haute sensibilité.

Pour les essais courants, le matériel du Laboratoire s'est augmenté d'un perméamètre, d'un galvanomètre balistique, d'un voltmètre redresseur Chauvin-Arnoux et d'un millivoltmètre Carpentier.

Signalons, en outre, que nous avons reçu en 1929 le groupe transformateur à 1 000 périodes par seconde et l'appareil de Delon, fournissant une tension continue de 250 000 V que j'avais mentionnés

dans mon rapport de l'année précédente comme commandés, mais non encore livrés.

Comme on le voit, ces acquisitions de matériel sont peu importantes. Il devient pourtant de plus en plus urgent de renouveler un grand nombre d'appareils courants achetés depuis plus de vingt ans et qui par suite n'ont plus les qualités exigées aujourd'hui.

Une somme plus importante ayant été inscrite au budget de 1930 au chapitre acquisition de matériel, nous pourrions procéder partiellement à ce renouvellement, mais nous estimons qu'un effort semblable devra encore être demandé en 1931 à la Société française des Electriciens.

*Installations nouvelles :* Nous avons continué en 1929 l'aménagement pour les besoins du Laboratoire des locaux laissés vacants par le transfert de l'Ecole.

Cet aménagement ne s'effectue qu'avec une assez grande lenteur

D'une part, ces locaux dans une construction faite en matériaux très légers se trouvaient dans un état tel que nous avons dû y faire effectuer des réparations importantes qui ont dépassé de beaucoup nos évaluations primitives.

De plus, ces travaux d'aménagements doivent être exécutés en apportant le moins de trouble possible dans le service courant du Laboratoire.

A l'heure actuelle, les principaux services (étalonnement des compteurs, mesures en courant alternatif, mesures d'isollements, essais magnétiques) sont installés dans les anciens locaux de l'Ecole. Une nouvelle salle pour les étalonnements en courant continu a été établie dans les anciens locaux et il ne nous reste plus qu'à transformer en bureaux les salles laissées vides, transformation bien nécessaire, car le personnel technique ne possédait que deux pièces pouvant servir de bureau, ce qui n'était pas sans présenter quelques inconvénients.

*Essais :* Le nombre des essais s'est élevé à 2048 contre 2190 en 1928.

Les recettes de 401 000 francs en 1928 ont été de 450 000 francs en 1929.

Nous insistons sur ce point qu'il ne faut pas attacher trop d'importance au nombre des essais.

En général, on demande aujourd'hui au Laboratoire Central beaucoup moins d'essais simples qu'il y a quelques années, la plupart des

constructeurs électriciens étant à même d'exécuter eux-mêmes ces essais. On s'adresse au contraire à nous pour toutes les mesures difficiles et délicates.

Nous donnons ci-dessous la répartition des essais dans les diverses catégories :

|                                   | 1928  | 1929  |
|-----------------------------------|-------|-------|
| Lampes à incandescence .....      | 683*  | 645** |
| Fers et tôles .....               | 753   | 634   |
| Systèmes d'éclairage divers ..... | 114   | 129   |
| Haute tension .....               | 150   | 108   |
| Voltmètres .....                  | 61    | 48    |
| Ampèremètres .....                | 68    | 56    |
| Transformateurs .....             | 96    | 77    |
| Piles .....                       | 26    | 13    |
| Résistivités { Conducteurs .....  | 39    | 63    |
| { Isolants .....                  | 19    | 22    |
| Compteurs divers .....            | 37    | 44    |
| Machines .....                    | 41    | 11    |
| Wattmètres .....                  | 16    | 30    |
| Compteurs Ministère .....         | 2     | 14    |
| Isolements .....                  | 1     | 2     |
| Oscillographes .....              | 9     | 9     |
| Accumulateurs .....               | 24    | 5     |
| Paratonnerres .....               | 4     | 5     |
| Divers .....                      | 47    | 133   |
|                                   | <hr/> | <hr/> |
|                                   | 2190  | 2048  |

\*Portant sur 1.803 lampes.

\*\*Portant sur 1.856 lampes.

Parmi les principaux essais, signalons le contrôle, pour une importante Société de Construction, de tous les matériaux magnétiques achetés. Pour rendre compte de l'importance de ce travail, il nous suffira de signaler que la masse des éprouvettes ayant passé par le Laboratoire en 1929 atteint 3 tonnes.

Parmi les essais de matériaux nous devons signaler aussi deux études importantes faites par le Laboratoire en 1929, ce sont : 1° la détermination de la résistivité de 1 000 fils d'aluminium ; cette détermination a été faite à la demande du Comité de l'aluminium de la Commis-

sion internationale, qui pour fixer les constantes d'un aluminium type avait exprimé le désir de connaître les résultats moyens des fabrications des divers pays, déduits de mesures effectuées sur un grand nombre d'échantillons.

2° La détermination des densités de courant admissibles pour des échauffements donnés dans des barres d'aluminium nues et peintes.

Nous avons effectué en 1929 des essais sur deux accumulateurs pour sous-marin. Ces essais sont effectués avec l'installation établie avec le concours du Ministère de la Marine qui permet de faire subir aux éléments au cours de leur charge des trépidations identiques à celles qu'ils subiraient dans la pratique.

Le service des courants alternatifs a procédé comme les années précédentes à de nombreux essais d'isolateurs à haute tension et à des étalonnements de transformateurs de mesure : ces derniers appareils ayant des masses très considérables, même pour des tensions ne dépassant pas 50 000 V, c'est en usine que nous avons effectué ces opérations qui sont très délicates, car il est nécessaire d'éliminer ou plutôt de corriger les déphasages produits dans les résistances utilisées par leur capacité par rapport au sol.

Nous reviendrons dans le chapitre « études » sur un procédé envisagé pour remédier à cet état de chose.

Dans les derniers mois de 1929, notre service de photométrie a été on peut le dire submergé par les essais de projecteurs d'automobiles.

Depuis 1926 un arrêté du Ministre des Travaux publics prévoyait que les projecteurs répondant au Code de la Route pour les croisements pourraient recevoir une approbation officielle. Mais aucune obligation n'était faite aux usagers de posséder des appareils approuvés et peu de constructeurs étaient venus nous demander de faire sur leurs appareils les constatations nécessaires pour obtenir l'approbation.

La situation a été changée par l'arrêté ministériel d'octobre 1929 obligeant toutes les voitures automobiles à être munies à partir du 1<sup>er</sup> mai 1930 de projecteurs agréés.

Nous avons été saisis immédiatement de très nombreuses demandes d'essais et, quoique grâce à la salle obscure de 60 mètres de longueur dont nous disposons à Malakoff nous puissions effectuer assez rapidement ces opérations, chacune de ces demandes a dû prendre son tour ; depuis la fin d'octobre, une équipe composée de deux ingénieurs et d'un électricien a consacré tout son temps à ce service des

projecteurs et je dois rendre hommage au dévouement et au zèle dont ont fait preuve en la circonstance M. WAGUET, chef du service de la photométrie et ses collaborateurs, qui n'ont pas hésité à travailler en dehors des heures ouvrables du Laboratoire pour assurer la vérification des dessins d'exécution des projecteurs et la rédaction des certificats.

Quatre-vingt-trois projecteurs ont été essayés en 1929.

Nous mentionnerons que quatorze compteurs ont subi en 1929 les épreuves nécessaires à leur approbation par le Ministère des Travaux publics.

Nous signalerons également qu'en 1929 nous avons poursuivi à la demande du Syndicat des Industries radioélectriques des recherches relatives à l'élimination des parasites d'ordre industriel.

Ces recherches ont été effectuées par M. STRELKOFF, ingénieur diplômé de la Section de Radioélectricité de l'Ecole Supérieure d'Electricité, sous la direction de M. JOUAUST.

La plupart des rapports que nous avons remis à ce sujet au Syndicat des Industries Radioélectriques ont été publiés par l'organe de ce Syndicat.

*Etudes et Recherches :* Nous avons signalé les difficultés que présentaient les étalonnements des transformateurs de mesure à haute tension par suite des capacités par rapport à la terre des résistances utilisées dans ces mesures.

M. de la GORCE avait imaginé il y a quelques années un dispositif d'enroulement des résistances qui devait éviter cet inconvénient.

Les Etablissements MERLIN et GERIN avaient bien voulu entreprendre la construction de ces résistances et un premier modèle pour une tension de 150 000 V a été réalisé.

L'étude de cette résistance ayant montré qu'elle présentait tous les avantages qu'on en attendait, nous avons mis en commande une résistance pour 300 000 V destinée à la mesure des différences de potentiel dans notre installation haute tension et une résistance pour 45 000 V portative et transportable, qui sera utilisée pour les étalonnements de transformateurs.

Comme je l'ai dit nous avons repris nos recherches sur les unités électriques et nous comptons effectuer une détermination de l'ohm en valeur absolue par une méthode imaginée par M. PICARD et qui a été décrite aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences.

Pour le moment, nous sommes dans la période préparatoire, construction d'inductances étalons, mise au point des procédés de mesure, etc...

Nous avons également repris l'étude de la construction des piles étalons.

Pour répondre au vœu du Comité consultatif des Unités Electriques établi par le comité international des Poids et Mesures, M. JOUAUST au cours d'un voyage à Berlin a emporté deux étalons de l'ohm international.

Les résultats obtenus ont été les suivants :

#### *Résistance*

| Numéro<br>de l'ohm | P.T.R.   | L.C.E.   | Différence           |
|--------------------|----------|----------|----------------------|
| 4702               | 1,000141 | 1,000081 | $5,6 \times 10^{-5}$ |
| 4701               | 1,000175 | 1,000067 | $4,8 \times 10^{-5}$ |

On voit que la différence entre les étalons de l'ohm de la physikalisch technische Reichsanstalt et ceux du Laboratoire Central qui était presque nulle il y a quelques années atteint maintenant 5 cent-millièmes d'ohm. Il y a là un point à éclaircir.

Nous avons également comparé un étalon d'inductance avec ceux du National Physical Laboratory.

Les résultats de cette comparaison sont les suivants :

| N. P. L. | L. C. E.                   |
|----------|----------------------------|
| 0,24605  | 0,2460 henry international |

En l'état actuel des choses, cette concordance était satisfaisante. Nous espérons arriver à mieux dans un laps de temps peu éloigné.

La question des étalons photométriques, en particulier ceux qui sont utilisés pour les mesures de flux a également été l'objet de travaux au Laboratoire.

Comme on a pu le voir dans une communication faite par M. JOUAUST à la deuxième Section et publiée dans le Bulletin, le Laboratoire Central est à peu près d'accord avec les Laboratoires des Etats-Unis et d'Angleterre pour les mesures de flux sur les lampes puissantes à atmosphère gazeuse, mais en désaccord de 5 à 6 pour 100 pour les mesures effectuées sur les lampes dans le vide.

Malgré de nombreuses recherches nous n'avons pu expliquer la cause de cette divergence.

Or, il est curieux de constater que des déterminations du rapport bougie internationale/hefner faites en Angleterre pour la mesure du flux de lampes à atmosphère gazeuse étalonnées à la Reichsanstalt conduisaient à la valeur 1,17 alors que la valeur de ce rapport devrait être 1,11.

M. JOUAUST avait également profité de son voyage à Berlin pour emporter des étalons de flux lumineux. Le résultat de la comparaison a été le suivant :

Pour des lampes à atmosphère gazeuse, les mesures de la Physikalisch technische Reichsanstalt et celle du Laboratoire conduisent bien à la valeur 1,11 pour la rapport bougie internationale hefner et à une valeur plus faible pour les lampes dans le vide.

Tous ces résultats sont contradictoires et les Laboratoires nationaux travaillent d'un commun accord à l'heure actuelle pour chercher à éclaircir cette question qui sera certainement examinée lors de la prochaine réunion du Comité consultatif des Unités Electriques.

*Relations avec le Comité électrotechnique français et l'Union des Syndicats de l'Electricité.* — M. JOUAUST a représenté le Comité français au Comité de l'Aluminium de la Commission électrotechnique internationale qui s'est réuni à Berlin en novembre 1929.

MM. JOUAUST, de la GORCE et DIETSCH ont collaboré en 1929 aux travaux de diverses commissions techniques de l'Union des Syndicats d'Electricité.

*Souscription :* Comme les années précédentes, un grand nombre d'industriels ont bien voulu prélever sur leur taxe d'apprentissage en faveur du Laboratoire des sommes dont le total nous a été des plus précieux pour équilibrer notre budget.

---



## II. — École supérieure d'électricité

### I. — NOUVEAUX AMÉNAGEMENTS RÉALISÉS A MALAKOFF

L'ensemble des bâtiments et locaux consacrés à l'enseignement continue à nous donner entière satisfaction et n'a subi aucun changement en 1929. Les services généraux ont été l'objet d'une nouvelle et importante extension : sur l'initiative éclairée et généreuse du groupement des secteurs de la région parisienne auxquels se sont joints de nombreux donateurs <sup>(1)</sup> une salle de restaurant, dotée d'une cuisine entièrement électrique et du matériel le plus moderne a été aménagée dans le sous-sol du vestibule des Elèves.

L'installation en a été faite sous la direction de la Société APEL, assistée de nos architectes MM. Appia et Papet. Dès maintenant, et bien que le nombre de repas journaliers demandés par nos élèves n'atteigne pas son maximum (130 à 150 pour les services du matin et du soir) les prix auxquels nous arrivons sont des plus modérés.

Nous ne saurions trop remercier ici les généreux donateurs qui nous ont permis de réaliser cette belle installation qui rend les plus grands services à nos élèves.

L'inauguration en a été faite sur l'invitation du groupe de Paris de la Société Amicale en un cordial repas qui réunissait près de 200 convives et ce même groupe, ayant ainsi appris le chemin de Malakoff nous a fait le grand plaisir de choisir notre restaurant pour les plus importantes de ses réunions mensuelles.

Le terrain sur lequel s'élève l'Ecole et que nous avons acquis en 1924 présentait une enclave d'angle fort gênante pour nos développements futurs. Nous avons pu acquérir dans de bonnes conditions cette enclave que jusqu'à nouvel ordre nous laissons dans son état

---

*(1) Installation de force et lumière :*

Société générale de travaux d'éclairage et de force.

Société force et lumière électriques.

Société Electro-câble.

L'Aluminium français.

*Matériel de cuisine :*

Constructeurs associés de Paris (C.A.P.).

Ch. Mildé fils et Cie.

*Armoire frigorifique :*

Compagnie industrielle d'appareils ménagers.

*Appareils de ventilation :*

Etablissements Ragonnot.

*Appareils d'éclairage :*

Compagnie des lampes.

Les Etablissements Fontaine.

actuel. Signalons enfin la remise en fonction d'un puits abondant qui existait sur notre terrain et qui nous permettra pendant l'été d'obtenir à peu de frais l'eau d'arrosage nécessaire.

## II. — MATÉRIEL

Ainsi que je l'ai rappelé dans mes précédents rapports, nous avons dû placer en deuxième urgence une partie importante de notre programme d'acquisition de matériel. Le besoin de ce matériel se fait de plus en plus sentir ; souscripteurs et amis n'ignorent pas l'importance de cette question et nous espérons beaucoup des résultats de leur active et persévérante bonne volonté.

## III. — PROMOTION XXXV (1928-29)

Il a été délivré à la fin de juillet 1929, 194 diplômes se répartissant comme suit :

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Officiers et ingénieurs délégués par l'Etat .....                                  | 30 |
| Ingénieurs des Arts et Métiers .....                                               | 29 |
| Ingénieurs des Instituts électrotechniques (Grenoble, Nancy, Toulouse) .....       | 29 |
| Licenciés ès Sciences .....                                                        | 12 |
| Elèves étrangers diplômés d'écoles techniques supérieures ....                     | 11 |
| Ingénieurs des Arts et Manufactures .....                                          | 8  |
| Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique .....                                      | 3  |
| Ingénieurs de l'Ecole Centrale Lyonnaise .....                                     | 4  |
| Ingénieurs civils de l'Institut Industriel du Nord de la France..                  | 3  |
| Ingénieur des constructions civiles (Ecole nationale des Ponts et Chaussées) ..... | 1  |
| Ingénieur des industries métallurgiques et minières .....                          | 1  |
| Elèves reçus aux concours antérieurs et divers .....                               | 17 |
| Elèves reçus au concours de 1928 .....                                             | 46 |

---

194

## IV. — PROMOTION XXXVI (1929-30)

*Composition de la promotion.* — La promotion en cours d'études comprend 206 élèves; en voici la composition :

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Officiers et ingénieurs délégués par l'Etat ..... | 29 |
|---------------------------------------------------|----|

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Ingénieurs des Arts et Métiers .....                               | 38 |
| Ingénieurs des Instituts Electrotechniques (Grenoble, Toulouse).   | 23 |
| Etrangers diplômés d'écoles techniques supérieures .....           | 12 |
| Licenciés ès Sciences .....                                        | 9  |
| Ingénieurs de l'Ecole de Physique et de Chimie industrielles ..    | 3  |
| Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique .....                      | 3  |
| Ingénieurs des Arts et Manufactures .....                          | 2  |
| Ingénieurs civils de l'Institut Industriel du Nord de la France .. | 2  |
| Ingénieur civil des mines .....                                    | 1  |
| Elèves reçus au concours de 1929 .....                             | 64 |
| Divers .....                                                       | 20 |

---

 206

4 jeunes filles figurent parmi nos élèves réguliers.

A ces élèves, il convient d'ajouter 4 auditeurs libres qui suivent tout ou partie de notre enseignement.

#### V. — RELATIONS DE L'ÉCOLE AVEC L'UNIVERSITÉ

Le nombre des étudiants de la Faculté des Sciences inscrits en 1928-1929 aux cours et travaux pratiques du certificat d'Electrotechnique générale, a été de 68, 12 certificats ont été délivrés en juillet et 10 en octobre. Depuis 1919, année de la création du cours, il a été délivré 186 certificats ; le nombre total des inscriptions se montant à 643, on voit que nous tenons à maintenir à un niveau élevé ce certificat qui, on le sait, joint avec deux autres certificats d'études supérieures, confère le grade de licencié ès sciences.

La Faculté des Sciences a, cette année, réservé sur le produit de la taxe d'apprentissage, une somme de 22 500 francs pour la chaire d'Electrotechnique générale. Ce crédit nous a permis de procéder à quelques achats d'appareils et de machines et d'accueillir un candidat à l'Agrégation, élève de l'Ecole Normale supérieure pour la préparation d'un diplôme d'études supérieures. D'autre part, et pour la première fois depuis sa fondation, le laboratoire d'Electrotechnique générale a été doté d'un crédit annuel permanent de 10 000 francs à dater du 1<sup>er</sup> janvier 1930.

## VI. — PRÉPARATION MILITAIRE

Les cours de préparation militaire supérieure (3<sup>e</sup> groupe) ont été assurés en 1928-29 par le Chef d'escadron Kolyszko, sous la haute direction du Général Jouvin et du Général Hauser.

Le brevet supérieur de préparation militaire qui est la sanction de cet enseignement, permet à nos anciens élèves d'accéder au grade d'officier de réserve au cours de leur service actif.

Pendant l'année scolaire 1928-29, 72 élèves de l'Ecole ont été inscrits à ce cours, 30 ont passé le concours du brevet supérieur de préparation militaire et 12 l'ont obtenu dans des armes diverses.

## VII. — ANCIENS ÉLÈVES

Le nombre total d'anciens élèves ayant passé par l'Ecole (non compris la promotion actuelle) est de 4094, sur lesquels 3616 ont obtenu le diplôme. Ces derniers se répartissent ainsi :

|                                                                                                                                                                                       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Officiers et ingénieurs de l'Etat .....                                                                                                                                               | 527   |
| Ingénieurs des Arts et Métiers .....                                                                                                                                                  | 537   |
| Licenciés ès sciences .....                                                                                                                                                           | 435   |
| Ingénieurs des Arts et Manufactures .....                                                                                                                                             | 214   |
| Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique .....                                                                                                                                         | 213   |
| Ingénieurs sortant d'écoles diverses (Centrale Lyonnaise, Physique et Chimie, Instituts Electrotechniques, Institut Industriel du Nord de la France, Ecole Aéronautique, etc...) .... | 256   |
| Elèves étrangers diplômés d'écoles techniques supérieures ....                                                                                                                        | 204   |
| Ingénieurs civils des Mines, Ponts et Chaussées, Constructions navales, marine marchande .....                                                                                        | 47    |
| Elèves reçus aux concours et divers .....                                                                                                                                             | 1183  |
|                                                                                                                                                                                       | <hr/> |
|                                                                                                                                                                                       | 3616  |

## VIII. — SECTION DE RADIOÉLECTRICITÉ

Il a été décerné à la fin de juillet 1929, 50 diplômes d'ingénieurs radioélectriciens.

XV<sup>e</sup> session (1929-30). — *Composition de la promotion.* — La session en cours d'études comprend 50 élèves, en voici la composition : Officiers désignés par le Ministère de la Guerre :

|                                                                                       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Génie .....                                                                           | 2     |
| Artillerie coloniale .....                                                            | 1     |
| Infanterie coloniale .....                                                            | 1     |
| Aéronautique .....                                                                    | 2     |
| Officiers et ingénieurs désignés par le Ministère de la Marine ....                   | 2     |
| Officiers et ingénieurs délégués par les Gouvernements étrangers <sup>(1)</sup> ..... | 17    |
| Elèves civils, français et étrangers .....                                            | 25    |
|                                                                                       | <hr/> |
|                                                                                       | 50    |

Le nombre d'anciens élèves brevetés et diplômés de la section de radioélectricité est de 588.

#### IX. — SECTION D'ÉCLAIRAGE

La sixième session de notre section d'éclairage s'est ouverte le 4 février 1929 et a été suivie par 33 élèves. — 30 ont obtenu le certificat d'études d'éclairage.

#### X. — SOCIÉTÉ AMICALE DES INGÉNIEURS E.S.E.

Le nombre de nos anciens élèves inscrits à la Société Amicale, continue à progresser normalement et atteint à l'heure actuelle près de 2 000.

#### XI. — BOURSES ET FONDATIONS

A la suite d'un article que j'avais publié dans la Revue des Deux-Mondes, une généreuse donatrice, Mme Hauvette-Michelin, nous a spontanément adressé un chèque de 120 000 francs pour subvenir chaque année aux frais d'études de l'un de nos élèves.

---

(1) Classement par nationalité des délégués étrangers à la section de radioélectricité :

|                                                           |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| Belgique : officier de l'armée de terre .....             | 1     |
| Chine : ingénieur des télégraphes .....                   | 1     |
| Danemark : officier de marine .....                       | 1     |
| Espagne : officiers de l'armée de terre .....             | 2     |
| — ingénieurs des télégraphes .....                        | 3     |
| Pologne : officiers de l'armée de terre et de l'air ..... | 3     |
| Roumanie : officier de l'armée de terre .....             | 1     |
| Turquie : officiers de l'armée de terre .....             | 4     |
| — ingénieur des télégraphes .....                         | 1     |
|                                                           | <hr/> |

17

D'autre part, deux de nos anciens donateurs, MM. Hueber-Regnault, d'une part, M. et Mme Guinochet, de l'autre, nous ont accordé, à titre de complément de la somme déjà versée, les premiers 45 000 francs, les seconds 55 000 francs. Les bourses dont nous disposons actuellement sont les suivantes :

Fondation Augustin Guyau : 4 800 francs à attribuer tous les 2 ans.

Bourse Guinochet : 4 195 francs à attribuer chaque année.

Bourse Hueber-Regnault : 5 985 francs à attribuer chaque année.

Bourse Paul Janet : 1 775 francs à attribuer chaque année.

Bourse Hauvette-Michelin : 5 400 francs à attribuer chaque année.

Nous ne saurions trop remercier nos généreux donateurs qui nous permettent ainsi de venir en aide à des jeunes gens des plus dignes d'intérêt. Les documents confidentiels qui, chaque année, sont mis sous nos yeux au moment de l'attribution de ces bourses, nous montrent qu'il faudrait quadrupler leur nombre pour satisfaire à peu près aux besoins qui nous sont signalés : nous faisons donc un nouvel appel à tous ceux qui sentent la nécessité de seconder les efforts véritablement admirables que font souvent des familles très peu fortunées pour permettre l'accès de l'Ecole à des jeunes gens méritants.

Tels sont, mes Chers Collègues, les diverses phases de l'activité du Laboratoire et de l'Ecole pendant l'année 1929. Comme je le signalais dans mon rapport de l'an dernier l'extension même de nos services amène des besoins nouveaux et nos ressources ne peuvent croître dans la même proportion : du côté de l'Ecole, le désir unanimement exprimé de diminuer plutôt que d'augmenter l'effectif de nos promotions, la nécessité de maintenir nos frais d'études à un taux acceptable pour tous, l'obligation morale où nous sommes d'aider les jeunes gens peu fortunés, nous obligent à avoir des appuis financiers extérieurs ; quant au Laboratoire, qui n'a vécu si longtemps que grâce au dévouement d'un personnel d'élite, il faut maintenant le doter d'un personnel supérieur stable et ayant l'espoir légitime d'y faire une carrière honorable ; il faut surtout développer le service des recherches qui jusqu'ici n'a vécu que de hasards et est pourtant l'un des buts assignés dès l'origine à notre établissement. Pour tous ces besoins, d'importantes ressources sont indispensables ; l'année 1929 a été pleine de promesses à cet égard, et l'année 1930 verra notre situation sinon définitivement assurée, au moins grandement améliorée

par le généreux mouvement de souscription qui a été provoqué par l'Union des Syndicats de l'Electricité. D'autre part, un premier crédit a été également inscrit à notre profit au budget de l'Etat, et nous avons le ferme espoir que ces concours, qui nous sont accordés de la façon la plus libérale, nous permettront de maintenir le Laboratoire et l'Ecole, sous la haute direction de la Société Française des Electriciens, dans les traditions constantes qui ont assuré leur vie et leur développement.

---

# GROUPE DU SUD-OUEST DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

---

**Assemblée générale du 16 Décembre 1929**

---

Rapport de M. DELASALLE, *Président*

Mes chers Collègues,

Nous sommes réunis ce soir en Assemblée générale annuelle et, conformément à l'article 14 des Statuts, j'ai à vous soumettre au nom du Comité du Groupe, le rapport de l'activité de notre Association pendant l'année 1929.

A la fin de l'année dernière, notre effectif était de 159 membres, dont 81 inscrits à la Société Française des Electriciens, et en terminant son rapport sur 1928, votre Président émettait le vœu de nous voir avant le début de 1930, atteindre le chiffre de 200.

Ce vœu, mes chers Collègues, a été exaucé, puisqu'à la date d'aujourd'hui, compte tenu des démissions pour départs de la région, nous sommes 218, dont 101 font partie de la S.F.E.

Ces chiffres vous montrent que nous continuons à progresser et à faire connaître et apprécier encore davantage le nom de notre Société mère.

Nous devons ce résultat à l'action de beaucoup d'entre vous et en particulier à l'infatigable propagande de notre Secrétaire Général, M. Louis ROUSSEAU. Je l'ai déjà remercié en votre nom l'année dernière ; je veux encore cette année, et vous m'excuserez j'en suis sûr de cette répétition, lui dire combien notre Groupe lui est reconnaissant de son action, et de l'amabilité avec laquelle il veut bien remplir ses fonctions.

Une partie de l'augmentation de notre nombre vient des conférences faites au cours de cette année à Tarbes ; je vous rappelle que l'an dernier, je vous avais fait part de nos intentions à cet égard, en vous avisant que notre but était de réunir le plus grand nombre possible de techniciens sous l'égide de notre Groupe, sans pour cela provoquer une décentralisation excessive, vu le danger qu'elle présenterait pour



notre fonctionnement même. Le résultat atteint a dépassé ce que nous espérions, puisque maintenant le nombre des adhérents dans les départements des Hautes et des Basses-Pyrénées, atteint presque le cinquième de notre effectif total.

Nous avons trouvé pour cette action une aide très grande de la part de notre Collègue, M. Charles LEDOUX, qui s'est dépensé sans compter pour organiser les conférences et recruter des nouveaux membres. Je lui renouvelle ici les remerciements que je lui ai déjà adressés, et j'espère que le concours qu'il apportera maintenant comme membre de votre Comité rendra encore plus efficace l'influence qu'il possède dans la région pyrénéenne.

Au cours de cette année, notre Groupe a organisé onze conférences dont trois à Tarbes, et je remercie à nouveau nos Collègues, MM. CHALON, DAUZÈRE, KUPPER, LAURU, LEDOUX et BRUNON qui nous ont tous très vivement intéressés par leurs communications. L'expression de notre gratitude toute particulière est aussi acquise au Président de la Société Française des Electriciens, M. BUNET, et à M. le Professeur BARBILLON qui, tous deux, se sont imposé les voyages de Paris et de Grenoble à Bordeaux pour venir traiter devant nous des sujets dans lesquels leur haute compétence donnait à leur exposé une autorité toute particulière. MM. BUNET et BARBILLON nous ont en outre montré ainsi tout l'intérêt qui est attaché par eux personnellement au Groupe du Sud-Ouest. Je ne veux pas oublier M. GALZIN qui, sur la demande de notre Collègue M. BRETON, est venu spécialement de Jeumont pour prendre la parole devant nous.

Nous avons été conviés par la Société des Electriciens à participer à l'organisation du voyage en France des membres de l'Institution Anglaise des Ingénieurs Electriciens, pour la partie qui se passait dans notre région. Votre Président est allé au-devant de nos confrères anglais à Eguzon avec notre Collègue, M. BOUTONNET, et une délégation du Comité du Groupe attendait nos hôtes à la gare de Bordeaux. La réception officielle a consisté en un dîner offert à Pau par la Société Française des Electriciens et le Groupe du S. O. Nos Collègues anglais ont été très favorablement impressionnés par les visites qu'ils ont faites dans nos Pyrénées, et M. ROWELL, leur secrétaire général, a tenu à exprimer par lettre à notre Groupe, dès son retour en Angleterre, la très cordiale sympathie de sa Société, et ses remerciements pour l'accueil que nous avons réservé à ses membres.

L'importance que les divers groupements ou Sociétés attachent à notre vitalité, me fait aussi un devoir d'exprimer notre gratitude à la Société de Propagande urbaine et rurale de l'Electricité qui a voulu nous associer à la manifestation qu'elle a organisé au cours de la dernière Foire de Bordeaux, ainsi qu'à la Société Française des Poteaux Electriques, qui a tenu à inaugurer officiellement ses Usines de Périgueux en notre présence et nous a reçus avec une cordialité et une amabilité auxquelles nous avons tous été très sensibles ; nous connaissons la part que notre Collègue, M. COSSET, a prise dans la réception qui nous a été faite à Périgueux et je l'en remercie encore en votre nom.

Pour cette année, mes chers Collègues, nous avons prévu un certain nombre de conférences qui auront lieu à Bordeaux et à Tarbes, et pour lesquelles vous recevrez en temps voulu les convocations.

Nous avons aussi pensé qu'en dehors des préoccupations d'ordre technique, nous devons maintenir à notre programme les distractions ; le succès de notre dîner amical du 26 janvier a été tel que nous vous avons conviés à en maintenir la tradition. Vous avez reçu à ce sujet avis qu'une réunion semblable aura lieu le 25 janvier prochain. Votre Comité espère que vous y viendrez encore plus nombreux et vous demande de bien vouloir, par des adhésions très prochaines, faciliter la tâche des organisateurs. Quant à la promenade du mois de juin, vous pouvez être assurés qu'elle ne sera pas non plus oubliée ; les exemples de Villandraut et de Saint-Emilion sont là pour la rappeler à votre Comité.

Il me reste, Messieurs, à exprimer ici publiquement tout le plaisir que nous avons éprouvé en apprenant la nomination au grade de Chevalier dans l'ordre de la Légion d'honneur de nos Collègues, MM. SOULE et Henri LE RICHE, et à leur renouveler nos félicitations.

Le nom de M. D. Soule, Président de la Société des Etablissements qui portent son nom, et président de la Chambre de Commerce de Tarbes, s'attache aux débuts mêmes de l'appareillage électrique ; l'industrie qu'il a créée à Bagnères-de-Bigorre en 1883, qu'il a développée chaque jour et qui comprend maintenant, non seulement la construction électrique, mais aussi la construction du matériel roulant, est une des plus prospères de notre région, et la distinction que M. Soule a reçue cette année, vient justement reconnaître toute une vie consacrée au travail et au bien.

M. Le Riche, directeur de l'Agence de Bordeaux de la Société Industrielle des Téléphones, est connu de vous tous, et tous ses amis ont été

heureux de voir distinguer ainsi un homme dévoué et serviable, et aussi un musicien délicat.

Vous savez, mes chers Collègues, que nous avons eu le vif regret de voir partir, il y a trois mois, notre très savant Collègue, M. le Professeur FOCH, appelé à une chaire de la Faculté des Sciences de Paris. Les membres du bureau de votre Comité ont tenu avant son départ, à se réunir autour de lui, afin de lui exprimer, avec nos félicitations pour la consécration qui est ainsi donnée officiellement à la haute valeur de son enseignement, tous nos regrets de le voir ainsi nous quitter et l'espoir qu'il restera, malgré l'éloignement, en rapports avec notre Groupe. M. Foch a bien voulu nous en faire la promesse.

En terminant, et après avoir assuré notre Président d'Honneur, M. le Professeur COUSIN, doyen de la Faculté des Sciences, de la reconnaissance du Groupe pour toute l'aide qu'il veut bien nous donner, permettez-moi de faire appel à votre activité pour étendre notre nombre et notre influence, et pour apporter à nos réunions, par vos communications et par votre présence, toute la vitalité qui leur est nécessaire.

---

## **INFORMATIONS**

### **DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS**

---

#### **Présentation de la nouvelle salle de démonstrations de la Compagnie des Lampes**

Le 21 janvier dernier, la deuxième Section de notre Comité a été invitée à visiter la salle de démonstrations de la Compagnie des Lampes.

Nos collègues ont été reçus par M. Wetzel qui excusa M. Maison-neuve de n'avoir pu présenter lui-même cette salle. Il rappela que cette installation a été réalisée pour répandre dans le public les principes de l'éclairage rationnel au moyen de démonstrations simples.

M. Chappat, Ingénieur à la Compagnie des Lampes, qui a pris une part active à l'installation de cette salle reproduit les démonstrations faites aux visiteurs.

Nos Collègues purent se rendre compte des différents systèmes d'éclairage, direct ou indirect et suivre des expériences simples montrant l'influence de ces systèmes au point de vue de l'éclairement, de l'uniformité des ombres, de la couleur, etc...

La conférence se termina par la présentation d'un essai de synchronisation d'effets de lumière colorée avec audition musicale.

#### **Visite du Centre d'études de la Société Industrielle des Procédés W. A. Loth**

Comme suite à la communication de M. BOURGONNIER, présentée le 14 février 1930 à la cinquième Section, les membres de cette Section, conviés par la Société Industrielle des Procédés W. A. Loth, se sont rendus le 3 mai 1930 avec M. Parodi, Président, au Centre d'études de Vaux-sur-Seine.

M. Bourgonnier et ses collaborateurs ont exposé et fait fonctionner devant les visiteurs les principaux dispositifs de la Société :

1° Guidage sans câble des routes maritimes ou aériennes par croisement d'ondes hertziennes dirigées issues de deux cadres émetteurs tournants ;

2° Câble-guide entourant un aérodrome (à une échelle réduite) pour permettre l'atterrissage des avions en cas de brume : ce câble-guide comporte deux lignes circulaires parallèles parcourues par un courant alternatif de fréquence musicale et permettant d'obtenir un effet cadre-antenne à l'émission ; une commutation convenable faite à l'émission avec une cadence déterminée engendre des points à l'extérieur de l'aérodrome et des traits à l'intérieur au-dessus de la nappe du câble-guide ; à l'intérieur et au-dessous de celle-ci le pilote perçoit des points ;

3° Guidage d'un bateau en Seine d'après un câble immergé dans le fond du fleuve et parcouru par un courant de 3 à 4 A en fréquence musicale.

Le fonctionnement de ces dispositifs est décrit dans la conférence de M. Bourgonnier et dans les brevets Loth.

L'intérêt de cette visite était de vérifier expérimentalement les résultats annoncés : les visiteurs ont été entièrement satisfaits à ce point de vue, et ils ont remercié en outre M. Bourgonnier de leur avoir fait faire un très agréable voyage.

#### **Remise de la Médaille Mascart à M. Paul Janet**

Le 30 avril dernier, dans l'Amphithéâtre de l'Ecole supérieure d'Electricité, au cours d'une cérémonie tout intime, devant les Membres et anciens Membres du Comité et les Elèves de la promotion 1929-30, notre Président, M. PARODI, a remis la Médaille Mascart à notre Président d'honneur, M. Paul JANET, après avoir rappelé le dévouement avec lequel celui-ci s'est consacré depuis 1895 aux deux créations de notre Société.

M. Janet, dans une allocution émue, rappela les principales étapes de sa carrière entièrement consacrée à l'Ecole et au Laboratoire.

#### **Remise de la Médaille Kelvin à M. André Blondel**

Nous avons reçu de l'Institution of Civil Engineers de Londres la plaquette qu'elle a éditée au sujet de la remise de la Médaille Kelvin à notre Président d'honneur, M. André BLONDEL, le 5 novembre 1929.

M. André Blondel ayant été empêché par son état de santé de se rendre à Londres, M. de Fleuriau, Ambassadeur de France, a reçu

en son nom la médaille des mains de Sir Brodie H. Henderson, Président de l'Institution of Civil Engineers.

Sir Brodie H. Henderson a rappelé que la Médaille Kelvin avait été fondée en 1913 par 19 Sociétés d'Ingénieurs anglais.

Elle a été attribuée successivement : en 1920 au Dr. W. C. Unwin (Grande-Bretagne) ; en 1923 au Professeur Elihu Thomson (Etats-Unis) ; en 1926 à Sir Charles A. Parsons (Grande-Bretagne) et enfin en 1929 à notre collègue M. André Blondel.

Sir Donald Mac Alister, après avoir rappelé les titres de notre Président d'honneur à cette attribution, s'adressa en ces termes à M. de Fleuriau :

« Excellence, nous vous prions d'accepter pour votre pays, dont M. Blondel est un des plus beaux fleurons, notre tribut de sincère admiration pour le dévouement qu'il consacre pour le plus grand bien de tous au progrès des sciences appliquées et, en particulier, au progrès de celle à laquelle vous associez avec tant de bonheur et un sens si profond le nom de « génie ».

M. l'Ambassadeur remercia au nom de tous les Ingénieurs français pour l'honneur fait ainsi à la France et la cérémonie se termina par des allocutions de Sir William H. Ellis, R. D. Moore, Anciens Présidents, et Sir Mac Alister.

---

ERRATA

*Bulletin n° 104, avril 1930, communication de M. Della Riccia,*  
page 366, en partant du haut :

ligne 20 : lire  $\sigma$  et s au lieu de b et s.

ligne 12 : lire *vecteur* au lieu de secteur ;

ligne 11 : lire  $\sigma$  et s au lieu de b et s ;

*Discussion du rapport de M. Bayle, p. 377, en partant du haut :*

ligne 2 : lire système métrique absolu ;

ligne 11 : lire je ne suis pas d'accord ; le chiffre 10, pour la gravité fictive normale, n'est pas recevable.

*Communication de M. Liénard : auto-amorçage d'un moteur asynchrone sur capacité,*

|                              |                                            |                            |
|------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| page 406 en partant du bas : | Lire                                       | au lieu de                 |
| ligne 10 : (formule) :       | $- M \frac{di'}{dt}$                       | $- M \frac{di}{dt}$        |
| ligne 9 : (formule) :        | $- L' \left( \frac{di'}{dt} \dots \right)$ | $- L' \frac{di}{dt} \dots$ |

|                                                             |                        |                       |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Page 408 en partant du bas :                                |                        |                       |
| ligne 7 :                                                   | $\alpha_1$             | $\alpha$              |
| ligne 33 : (1 <sup>er</sup> terme du déterminant $\alpha$ ) | $-\sigma \gamma \rho'$ | $-\sigma \gamma \rho$ |
| ligne 34 :                                                  | résultant              | résultat              |

|                               |     |          |
|-------------------------------|-----|----------|
| Page 410, en partant du bas : |     |          |
| lignes 3 et 8 (formules) :    | $R$ | $\alpha$ |

|                             |                         |                         |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Page 412 :                  |                         |                         |
| ligne 2 de l'annexe :       | première                | sixième                 |
| ligne 5 en partant du bas : | $L \frac{di}{dt} \dots$ | $I \frac{di}{dt} \dots$ |

## TRAVAUX DES SECTIONS

---

### LE GUIDAGE DES NAVIRES ET DES AVIONS <sup>(1)</sup>

par M. BOURGONNIER

*Directeur de la Société Industrielle des Procédés Loth.*

---

*Guidage par câble. — Applications à l'aviation du câble-guide. — Guidage sans câble.*

#### *Guidage par câble*

Le principe du guidage par câble est bien connu. Sans faire remonter l'invention à Faraday ou Graham Bell on peut trouver des travaux sur la question dès 1892 (Stevenson) et même peut-être avant. Des essais furent tentés par différents expérimentateurs, Eversted, Preece, Owens, Grossley, etc... Mais les résultats étaient troublés par l'existence du champ magnétique autour du câble.

A la fin de la guerre, l'Allemagne, l'Angleterre et la France étudièrent la question, et, pour la première fois, on rechercha la forme du champ.

Les résultats, dus pour la plus grande part aux travaux de M. Loth, furent les suivants :

Le champ autour du câble n'est pas circulaire car il est dû non uniquement au câble mais aussi aux courants de retour qui s'épanouissent dans l'eau autour du câble, ainsi qu'aux courants induits dans ce milieu conducteur.

Les lignes de ce champ constituent une famille de courbes ayant allure de doubles lemniscates formant des trèfles à quatre feuilles. Entre deux feuilles successives, il y a une ligne d'inversion du champ due au fait qu'à une certaine distance du câble, la composante du champ due à celui-ci devient moins forte que la composante de sens contraire due à l'ensemble des courants de retour.

---

(1) Communication présentée à la 5<sup>e</sup> Section de la Société française des Electriciens le 14 février 1930, sous la présidence de M. REYNAUD-BONIN.



Cette forme, si elle n'est pas simple, se prête pourtant aux réalisations pratiques tant que le câble est rectiligne, ou que les courants de retour sont canalisés dans le chenal d'immersion, les courants restant à peu près parallèles au câble (ce qui est le cas à Brest). Dès qu'il n'en est plus ainsi, les phénomènes se compliquent et c'est tout juste si l'on peut en prévoir l'allure. L'appareillage de réception, devant comprendre deux cadres latéraux sur chaque bord du navire pour la discrimination du côté du câble où l'on est situé, est encombrant et la réception est grandement influencée par l'effet de coque du navire.

Une disposition très simple, inventée récemment par M. Loth à l'occasion d'une installation réalisée à La Corogne, permet de supprimer tous ces inconvénients.

De chaque côté du câble de guidage on dispose, sur terre, des lignes sur poteaux dites lignes garde-côte, destinées à capter les courants de retour de façon à les écarter le plus possible du câble de guidage. Dans ces conditions, le champ magnétique autour du câble redevient circulaire. De plus, les courants de retour s'épanouissent vers le large dans une direction sensiblement perpendiculaire au câble, perceptibles à grande distance de la côte ils permettent de signaler au loin l'extrémité du câble et évitent l'emploi d'un appareil spécial (une cloche sous-marine dans les installations allemandes faites pendant la guerre).

L'emploi isolé des lignes garde-côte pour signaler la présence d'une île aux bâtiments naviguant dans les parages, offre d'ailleurs un grand intérêt. On installera, le long de la côte, ou suivant le diamètre de l'île, une ligne sur poteaux alimentée par un alternateur de 400 à 1 500 p.s dont les deux extrémités sont connectées à la mer.

Les lignes de courant se distribueront à peu près parallèlement à la côte et s'épanouiront vers le large, théoriquement jusqu'à l'infini; la densité du courant varie peu avec l'éloignement de la côte et l'action sur un appareil récepteur convenable reste sensible à assez grande distance.

Toute chose égale d'ailleurs, la portée de cette installation varie à peu près comme la racine carrée de la longueur de la ligne. Ainsi, une installation de 1 kW comprenant une ligne de 4 km parcourue par un courant de 10 A est entendue à plus de 15 km et, à 10 km, il est possible de déterminer la direction locale du courant à 3° près. On se rend compte qu'une telle installation, moins coûteuse qu'une grosse sirène de brume, a une portée plus grande, un fonctionnement plus

sûr et surtout donne des indications précises qu'une installation sonore ne peut donner.

L'appareillage de réception pour le guidage par câble à champ circulaire ou par lignes garde-côte, comprendra trois cadres fixes formant un octaèdre placés au haut d'un mât pour le soustraire aux effets de coque. Les courants induits dans ce cadre seront combinés deux à deux à l'aide d'un répétiteur d'induction (afin de connaître la direction, le côté et la distance du câble) et amplifiés à l'aide d'un amplificateur basse fréquence à trois étages.

### *Applications à l'aviation du câble-guide*

Dès le début de ses recherches sur le câble-guide, M. Loth eut l'idée de l'appliquer à l'Aviation où la nécessité du guidage se faisait plus sentir encore que pour les navires. Des installations furent expérimentées avec succès à Rochefort et à Chartres et une installation importante fut faite au Bourget. De graves objections, toutefois, furent faites à la généralisation de ce procédé, principalement d'une part la difficulté pratique d'installer des lignes droites coûteuses traversant des régions de populations assez denses, et, d'autre part, la fixité de ces installations, obligeant les avions à suivre toujours les mêmes routes aériennes alors que les conditions météorologiques peuvent conduire à prendre des routes détournées.

Le guidage sans câble que nous examinerons ensuite, au prix d'une précision moindre, répond complètement à ces objections.

Toutefois, lorsqu'il s'agit de l'arrivée sur un aérodrome ces objections tombent et il y a lieu de donner des indications d'une précision telle que le câble de guidage peut seul les donner.

L'aérodrome devra être encerclé d'une ligne parcourue par un courant alternatif de fréquence musicale ou même de moyenne fréquence. L'action perturbatrice du courant de retour par la terre sur le champ magnétique est éliminée, puisque le circuit se boucle sans passer par la terre.

La ligne sera unifilaire ou à plusieurs conducteurs, suivant les applications que l'on aura en vue ; une ligne unifilaire donne un rayonnement plus considérable et une ligne multifilaire permet d'obtenir un effet cadre-antenne à l'émission, d'où possibilité d'indiquer au pilote, par des signaux simples, non seulement l'intérieur et l'exté-

rieur de l'aérodrome, mais aussi le plan horizontal appelé nappe de hauteur qui contient la ligne.

Par raison de symétrie, le champ en un point est contenu dans un plan vertical passant par le centre du cercle formé par la ligne ; un observateur pourra ainsi, par recherche d'un minimum de réception sur cadre vertical, trouver avec une grande exactitude la direction du centre de l'aérodrome. En utilisant la réception cadre-antenne, on peut, par une simple commutation, lever l'incertitude de  $180^\circ$  et connaître si on est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'aérodrome. Si la ligne a un diagramme d'émission en cardioïde (effet cadre-antenne), la commutation pourra se faire à l'émission avec une cadence déterminée, de façon à donner, par exemple, des points à l'extérieur de l'aérodrome et des traits à l'intérieur, au-dessus de la nappe de hauteur. Au-dessous de celle-ci et à l'intérieur on a des points.

La réception se fera avec un appareil très simple, comprenant un amplificateur basse fréquence à trois étages et une hétérodyne qui transforme le courant reçu sur le cadre et l'antenne en un courant de fréquence audible.

### *Guidage sans câble*

Le guidage sans câble, comme on le sait, est un procédé qui permet de tracer des routes de formes quelconques à l'aide de deux phares émettant des ondes dirigées et tournant de telle façon que le point de concours de leur émission décrive successivement tous les points de la route, les mêmes indications se répétant à chaque tour.

Les ondes émises par les phares peuvent être sonores, lumineuses, infra rouges, ou hertziennes. Ce qui importe c'est qu'elles puissent être dirigées. Le mouvement des deux phares sera déterminé pour chaque route, si l'on se fixe une condition supplémentaire qui est la suivante : lorsqu'un observateur est situé en dehors de la route, il percevra les émissions des phares avec un décalage de temps proportionnel à la distance dont il est écarté de la route, le signe de ce décalage de temps (c'est-à-dire l'ordre dans lequel il voit les phares) le renseignant sur le côté de la route sur lequel il se trouve.

On sait que, dans ces conditions, un observateur navigant dans les parages de la route saura, dès une première observation, de quel côté et à quelle distance de la route il est situé et, à la deuxième observation (dix ou quinze secondes après, pour les phares lumineux, une

à trois minutes après pour les radiophares), s'il s'éloigne ou se rapproche de la route et par suite le cap à suivre pour retrouver la route. La précision de ce procédé de guidage est théoriquement la même pour tous les points de la route ; en effet, puisqu'à un même écart de temps correspond un même écart de distance de la route, l'erreur d'appréciation sur la distance de la route sera partout, proportionnelle à l'écart de temps minimum pouvant séparer deux perceptions. Toutefois, la précision des résultats est aussi fonction de celle avec laquelle l'observateur détermine l'époque de réception d'une émission.

C'est sur l'amélioration de ce dernier point qu'ont porté les efforts de M. Loth et de ses collaborateurs, principalement pour le guidage par ondes hertziennes dirigées.

Il y a lieu, tout d'abord, de remarquer que le guidage par ondes hertziennes dirigées est exempt des erreurs auxquelles est soumis la radiogoniométrie de bord : erreurs quadratales, puisqu'on reçoit par antenne ; erreur de détermination des angles, erreur de calcul, correction de Givry, etc., puisqu'on cherche, non une mesure des angles, mais l'observation d'une coïncidence ou à la rigueur la mesure d'une différence de temps.

Les résultats ont été améliorés d'une façon considérable par rapport à ceux obtenus, à l'aide de la radiogoniométrie, grâce à deux perfectionnements, l'un à l'émission, l'autre à la réception.

1° A l'émission, on fera varier la vitesse de rotation du phare pour qu'il soit pointé à chaque instant, non vers le point de la route où son émission doit parvenir à l'instant considéré, mais de telle façon que l'émission parvienne effectivement à ce point, ce qui tient compte des anomalies de propagation. Sans doute ces anomalies sont mal connues et variables dans le temps, mais on en effectuera la correction en moyenne et on tiendra compte de leurs variations les plus importantes jour-nuit, été-hiver, à l'aide de dispositifs appropriés. On peut ainsi espérer réduire ces erreurs qui varient, en pratique, depuis 8 à 10° jusqu'à un ou deux degrés maximum.

2° A la réception on utilisera, à la suite du poste récepteur de T.S.F. l'appareil filtro-sélecteur de M. Marrec. Cet appareil, qui fonctionne comme un relais à seuil, permet en quelque sorte de transformer le diagramme bicirculaire d'un cadre émetteur en un diagramme constitué par deux secteurs ayant la forme de « quart de brie ».

Dans ces conditions, le minimum assez flou des réceptions du cadre tournant est transformé en un silence durant plus ou moins longtemps à « bords » très nets. Si le diagramme d'émission est bien symétrique, le milieu de ce silence correspondra au passage du plan du cadre et pourra être déterminé, non plus à deux ou trois degrés près, mais avec une précision de l'ordre du demi-degré.

La détermination du milieu du silence se fait d'ailleurs, non par des mesures de temps compliquées, mais indirectement d'une façon très simple. Ainsi, l'installation de démonstration du Centre d'Etudes de Vaux-sur-Seine comprend deux radiophares émettant l'un des points, l'autre des traits complémentaires l'un de l'autre. Si les temps de silence sont égaux (et on s'arrange en pratique pour qu'il en soit ainsi) on recevra, pendant le passage des émissions, un signal continu (trait+point) ; pendant le passage du silence d'un des signaux, le signal complémentaire et enfin on ne recevra rien pendant les instants communs des passages des deux silences.

Il s'ensuit qu'on percevra en général un silence encadré d'un groupe de points et d'un groupe de traits en nombre égal et d'un signal continu. Ainsi la réception suivante

signifiera qu'on est à droite de la route à deux unités de distance.

## La réception

indiquera que l'on est sur la route  
et enfin la réception

signifiera que l'on est à gauche de la route à quatre unités de distance.

Cette unité de distance (correspondant au maximum pratique de points et de traits par seconde d'une part et à la vitesse de rotation d'autre part) a été trouvée expérimentalement égale à 4 m environ pour une route de 1 500 m.

Sans espérer qu'à grande échelle des résultats aussi remarquables pourraient être obtenus, on peut escompter une précision de l'ordre du centième de la longueur de la route. Il faut se rappeler, à ce sujet, que le système d'alignement dit radio beacon, mis au point en Amérique, ne donne qu'une précision de l'ordre du dixième de la distance au phare émetteur.

Les résultats d'ailleurs, ne seraient-ils pas plus précis que ceux obtenus par radiogoniométrie ou radio alignements, le système n'en conserverait pas moins une nette supériorité sur ce que l'on fait maintenant. En effet, la simplicité d'application du procédé est telle que n'importe quel pilote pourra l'utiliser sans le secours ni d'un radiotélégraphiste ni d'un navigateur ; d'autre part, la possibilité de modifier la route à chaque instant, suivant les indications météorologiques et de lui donner une forme à peu près quelconque, ouvre des possibilités de sécurité et d'exploitation rationnelle des lignes aériennes qui avaient été vainement recherchées jusqu'à ce jour.

---

# REMARQUES SUR LES DERNIERS MULTIPLICATEURS STATIQUES DE HAUTE FRÉQUENCE EMPLOYÉS EN T.S.F. <sup>(1)</sup>

par M. G. E. PETIT

*Ingénieur des Télégraphes.*

---

*Préambule. — Description succincte des multiplicateurs Schmidt-Dornig. — Génération des harmoniques impairs. — Amplitude des harmoniques d'après une hypothèse générale; valeur des pointes de tension; exemples numériques. — Cas des courbes d'induction non symétriques. — Amplitude des harmoniques dans le cas le plus général. — Conclusion.*

## I. — PRÉAMBULE HISTORIQUE

Les derniers multiplicateurs statiques de haute fréquence employés en T.S.F. sont les plus simples de tous ceux qui ont été imaginés depuis Léonard, Weber, et Maurice Joly. L'idée primordiale d'extraire les harmoniques d'un noyau magnétique saturé par une source alternative a été reprise en Allemagne par W. Dornig, et par K. Schmidt avec la Cie Lorenz. Un nouveau système T.S.F., nettement supérieur aux anciens multiplicateurs, a été ainsi mis au point dès 1924, présentant tous les caractères d'un système définitif.

## II. — DESCRIPTION SUCCINCTE DES MULTIPLICATEURS SCHMIDT-DORNIG

Un alternateur de 7 500 p/s environ sature un noyau dans l'enroulement duquel on retire directement un courant de fréquence harmonique impaire quelconque, d'un rang élevé comme par exemple le 45<sup>e</sup> harmonique ; l'artifice employé consiste à insérer entre les bornes de l'enroulement du noyau un branchement auxiliaire, self et capacité en série, présentant une impédance faible pour une fréquence harmonique impaire intermédiaire entre la fréquence fondamentale de l'alternateur et l'harmonique désirée ; ce branchement auxiliaire n'est

---

(1) Communication présentée à la séance du 14 mars 1930 de la 5<sup>e</sup> Section, sous la présidence de M. REYNAUD-BONNIN.

nécessaire que pour la production des harmoniques de rang élevé, supérieur à 33 par exemple. On peut s'en passer en utilisant deux multiplicateurs en cascade ; par exemple la longueur d'onde de 242 m. peut s'obtenir en multipliant la fréquence fondamentale 7 500 p/s par 11 puis par 15.

Le noyau magnétique est constitué par des fils isolés de diamètre jusqu'à 0,04 mm, ou par des tôles d'épaisseur jusqu'à 0,007 mm. Dans les derniers modèles Schmidt-Lorenz, le fer entoure le cuivre comme dans les câbles Krarup. Pour fixer les idées, la longueur d'onde de 242 m dans un poste de 2 kW-antenne est obtenue par 2 multiplicateurs : chacun d'eux a un encombrement d'environ 8 cm  $\times$  7 cm  $\times$  3 cm et comporte 6 spires de ruban de cuivre entourées par des ron-

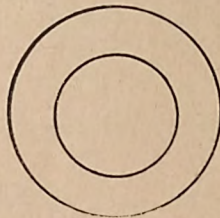


Fig. 1. — Rondelle grandeur réelle.

delles de tôle représentées en vraie grandeur sur la figure 1, le tout plongé dans un bac d'huile réfrigérée ; le poids total des rondelles de fer n'atteint pas 100 g !

Quand on examine pour la première fois ces multiplicateurs, on éprouve quelque étonnement de pouvoir si facilement multiplier la fréquence de l'alternateur par 165, comme dans l'exemple ci-dessus, avec un rendement satisfaisant, et d'obtenir 2 kW dans l'antenne avec 100 gr à peine de fer. Les remarques exposées ci-après aident à la compréhension des résultats du nouveau système.

### III. — GÉNÉRATION DES HARMONIQUES IMPAIRS

La courbe en trait plein (fig. 2) de l'induction  $B$  d'un noyau magnétique, en fonction de la phase  $x = \omega t$  du courant magnétisant de fréquence fondamentale, peut être représentée par une série de Fourier ; elle ne comprend que des sinus en raison de sa symétrie par rapport à l'origine, et uniquement des termes impairs si on admet



la symétrie par rapport à l'axe  $x = \frac{\pi}{2}$ . Cette courbe d'induction peut donc être représentée par la série

$$B = \frac{4}{\pi} B_0 \left[ A_1 \sin \omega t + \frac{A_3}{3} \sin 3\omega t + \frac{A_5}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{A_n}{n} \sin n\omega t + \dots \right]. \quad (1)$$

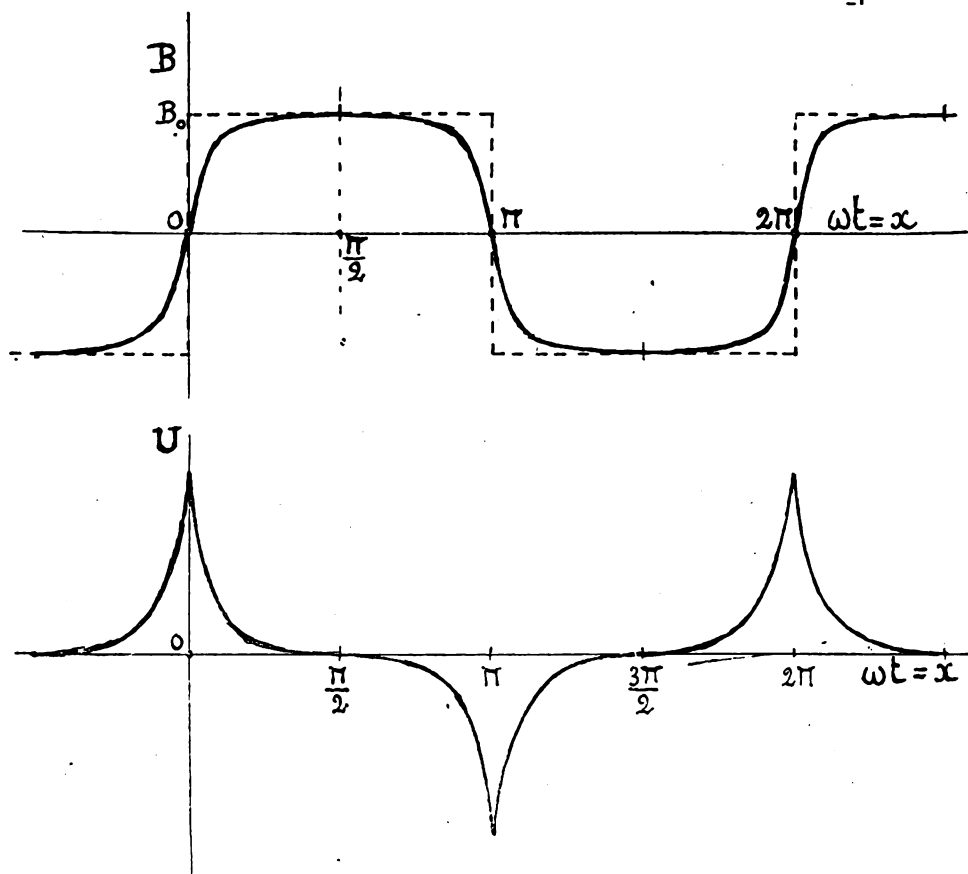


Figure 2.

La tension  $U$  entre les bornes de l'enroulement de  $N$  spires sur le noyau de section utile  $S$  est

$$U = NS \frac{dB}{dt},$$

c'est-à-dire, en dérivant la série (1), que la courbe de tension  $U$  de la figure 2 est représentée par la série

$$U = U_0 [A_1 \cos \omega t + A_3 \cos 3\omega t + A_5 \cos 5\omega t + \dots + A_n \cos n\omega t + \dots] \quad (2)$$

avec

$$U_0 = \frac{4}{\pi} B_0 \omega NS.$$

Or, lorsqu'on sature le noyau de plus en plus, la courbe B se rapproche constamment de la ligne brisée rectangulaire (en pointillé sur la figure 2) qui, comme on le sait, est représentée par la série de Fourier bien connue :

$$\frac{4}{\pi} B_0 \left[ \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\omega t + \dots \right].$$

Par conséquent, les coefficients  $A_1 A_3 A_5 \dots A_n \dots$  des séries (1) et (2) tendent vers 1 lorsque le noyau est de plus en plus saturé. Autrement dit, par la considération de la série (2), on a démontré ceci :

Entre les deux bornes d'un enroulement à noyau saturé, entre lesquelles est appliquée une tension d'une certaine fréquence fondamentale, on trouve, *superposées, toutes les tensions harmoniques impaires*, et ces tensions tendent à être égales à la tension appliquée lorsque le noyau est de plus en plus longtemps saturé pendant chaque alternance fondamentale.

#### IV. — AMPLITUDE DES HARMONIQUES

##### DANS LE CAS D'UNE HYPOTHÈSE GÉNÉRALE

##### SUR LA FORME DES COURBES D'INDUCTION ET DE TENSION

Une hypothèse générale très plausible, conduisant à des résultats simples, permet d'évaluer les coefficients précédents  $A_1 A_3 A_5 \dots A_n \dots$

Remarquons d'abord sur la figure 3 que la courbe d'induction B, avec les nouveaux alliages facilement saturables comme le permalloy, présente un palier AA' rigoureusement rectiligne ; la courbe de tension U correspondante est formée d'arcs et présente de véritables pointes dans la pratique (voir Martienssen, Phys. Ztsch. 1910, pages 448 et suivantes). Faisons l'hypothèse générale que l'arc OA de la courbe d'induction B de la figure 3 est fonction entière du troisième degré en x et qu'il peut être représenté par l'équation.

$$B = B_0 \left[ \frac{x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + \frac{3x}{a} \right] \quad (3)$$

dans laquelle le paramètre  $a = OA'$  correspond à la phase à partir de laquelle le noyau est complètement saturé.

Dans cette hypothèse, l'arc MA' de la courbe de tension sera un arc de parabole définie par l'équation dérivée.

$$U = \frac{\pi}{4} U_0 \left\{ \frac{3x^2}{a^3} - \frac{6x}{a^2} + \frac{3}{a} \right\} \quad (4)$$

avec

$$U_0 = \frac{4}{\pi} B_0 \omega NS.$$

Le calcul des termes des séries de Fourier correspondant aux deux courbes de la figure ne présente alors aucune difficulté et le coefficient de l'harmonique impair de rang  $n$  est donné par l'expression

$$A_n = \frac{6}{n^3 a^3} [n \cdot a - \sin n \cdot a].$$

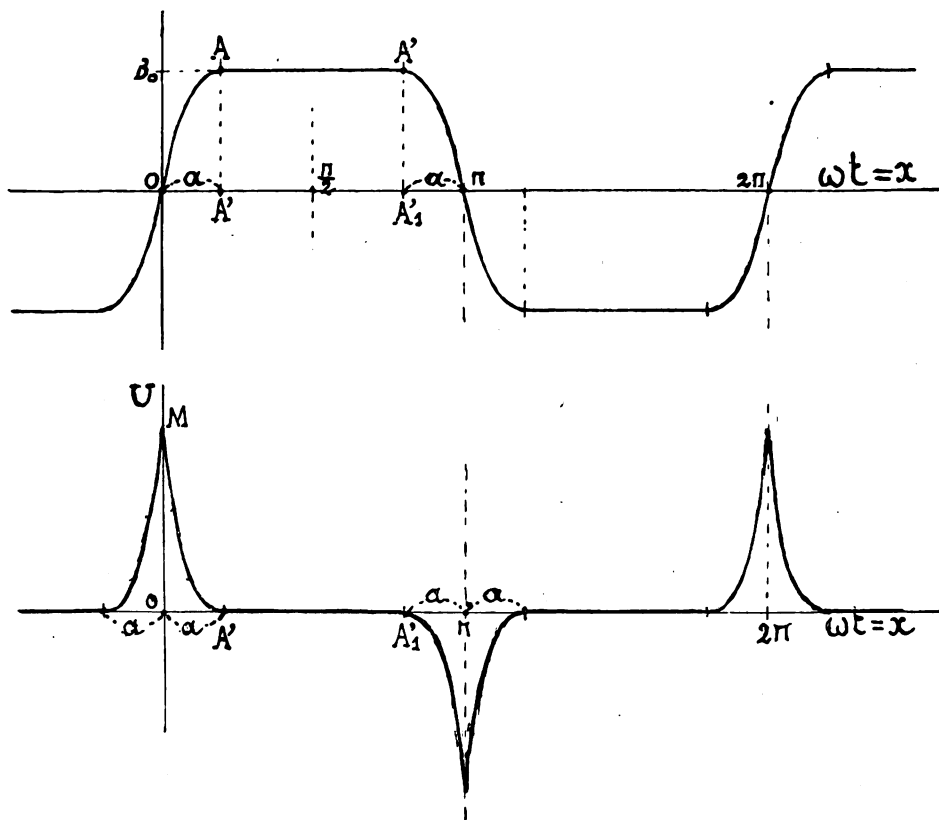


Figure 3.

*Remarque.* — Les coefficients  $A_1, A_3, A_5, \dots, A_n, \dots$  s'évalueront facilement d'après la courbe de la figure 4 donnant les valeurs de

$$Z = \frac{6}{A^3} (A - \sin A)$$

en fonction de  $A = n \cdot a$ .

Or, l'ordonnée  $Z$  de cette courbe diminue constamment de 1 à 0 quand  $A$  part de 0 et croît indéfiniment ; il en résulte :

1° pour une valeur donnée de  $a$ , c'est-à-dire pour une raideur déterminée de la courbe d'induction du noyau, les tensions harmoniques

impaires successives diminuent constamment jusqu'à 0 au fur et à mesure que leur rang s'élève ;

2° si  $a$  tend vers 0, c'est-à-dire si le front de la courbe d'induction est de plus en plus raide, autrement dit si le noyau se sature de plus en plus rapidement, tous les coefficients  $A_1 A_3 A_5 \dots A_n \dots$  tendent vers 1, comme nous l'avons déjà vu dans la remarque générale précédente.

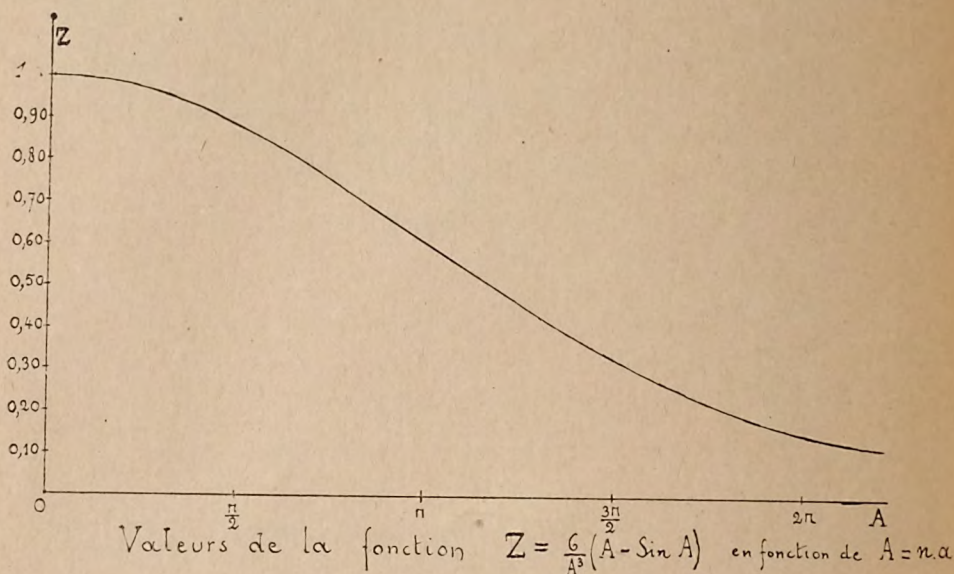


Figure 4.

*Valeur des pointes de tension.* — La valeur  $U_{\max}$  des pointes de tension aux instants  $0, \pi, 2\pi, 3\pi$ , etc., est d'après l'équation (4) et d'après la série (2)

$$U_{\max.} = \frac{3\pi}{4a} U_0 = U_0 [A_1 + A_3 + A_5 + \dots + A_n + \dots].$$

*Applications numériques :*

*1<sup>er</sup> exemple :*

$$a = \arccos 5^\circ = \frac{\pi}{36} \left( \text{noyau saturé les } \frac{17}{18} \text{ du temps} \right),$$

$$\frac{U}{U_0} = \left[ \begin{array}{l} \cos \omega t + 0,99 \cos 3\omega t + 0,99 \cos 5\omega t + 0,98 \cos 7\omega t \\ \quad + 0,97 \cos 9\omega t + 0,95 \cos 11\omega t + 0,94 \cos 13\omega t \\ \quad + 0,92 \cos 15\omega t + 0,89 \cos 17\omega t + 0,86 \cos 19\omega t \end{array} \right].$$

La 41<sup>e</sup> harmonique est encore supérieure à la moitié de la tension fondamentale.

Les pointes de tension instantanées sont données par

$$U_{\max.} = \frac{3\pi}{4a} U_0 = 27 U_0.$$

2<sup>e</sup> exemple :

$$a = \arccos 10^\circ = \frac{\pi}{18} \left( \text{noyau saturé les } \frac{8}{9} \text{ du temps} \right),$$

$$\frac{U}{U_0} = \begin{bmatrix} \cos \omega t + 0,99 \cos 3\omega t + 0,96 \cos 5\omega t + 0,93 \cos 7\omega t \\ + 0,88 \cos 9\omega t + 0,83 \cos 11\omega t + 0,77 \cos 13\omega t \\ + 0,70 \cos 15\omega t + 0,65 \cos 17\omega t + 0,58 \cos 19\omega t \\ + 0,51 \cos 21\omega t + 0,44 \cos 23\omega t + 0,38 \cos 25\omega t \\ + 0,33 \cos 27\omega t + 0,28 \cos 29\omega t + \text{etc.} \end{bmatrix}.$$

Les pointes de tension ont pour valeur

$$U_{\max.} = \frac{3\pi}{4a} U_0 = 13,5 U_0.$$

#### V. — CAS DES COURBES D'INDUCTION NON SYMÉTRIQUES

En réalité, la courbe d'induction n'est pas tout à fait symétrique par rapport à l'axe  $x = \frac{\pi}{2}$ , comme nous l'avons supposé au § III.

Cette distorsion, inévitable lorsque le noyau débite de l'énergie, se traduit sur les courbes de la figure 3 par une inégalité entre  $OA' = a_1$  et  $A'_1\pi = a_2$  et par une différence entre les pointes de tension positives et négatives. Les harmoniques pairs apparaissent.

On démontre facilement que la valeur du coefficient  $A_n$ , dans les développements en séries de Fourier des courbes d'induction et de tension, est égale pour  $n$  impair à la demi-somme des coefficients.

$$\frac{6}{n^3 a_1^3} (na_1 - \sin na_1) \quad \text{et} \quad \frac{6}{n^3 a_2^3} (na_2 - \sin na_2)$$

et à leur demi-différence pour les harmoniques pairs.

#### VI. — AMPLITUDES DES HARMONIQUES DANS LE CAS LE PLUS GÉNÉRAL

Dans le cas général de courbes quelconques données pour l'induction et la tension, on pourra toujours considérer celles-ci comme encadrées entre deux courbes particulières envisagées ci-dessus, l'une définie par des paramètres  $a_1$  et  $a_2$ , l'autre définie par des paramètres  $a'_1$  et  $a'_2$ . Le coefficient  $A_n$  de la série de Fourier représentant une

courbe générale sera compris entre les 2<sup>e</sup> coefficients, calculés selon les règles ci-dessus, correspondant aux deux courbes particulières.

## VII. — CONCLUSION

Les séries de Fourier à termes de rang impair  $n$

$$\frac{24}{\pi} B_0 \sum \frac{na - \sin na}{n^3 a^3} \sin n \omega t$$

et

$$6 U_0 \sum \frac{na - \sin na}{n^3 a^3} \cos n \omega t$$

qui représentent respectivement les courbes d'induction  $B$  et de tension  $U$  de la figure 3, ainsi que les séries à 2 paramètres  $a_1$  et  $a_2$  envisagées dans le § V, permettent d'évaluer d'une façon simple les amplitudes des harmoniques dans un noyau saturé.

D'autre part, ces séries, que le hasard m'a fait trouver, sont peut-être inédites, et j'ai pensé qu'il était utile de les faire connaître, avec l'espoir qu'elles pourront servir à l'étude d'autres phénomènes.

# LAMPES A GAZ RARES A BASSE TENSION PAR TACHE CATHODIQUE <sup>(1)</sup>

par M. ABADIE

*Ingénieur des Arts et Manufactures*

---

*Première solution des lampes à basse tension : lampe américaine. — Seconde solution. — Constitution de la lampe à tache cathodique. — Chutes cathodiques et chutes anodiques. — Caractéristique électrique. — Lampes à vapeurs métalliques. — Choix du gaz rare. — Technique de la fabrication. — Application des cathodes au cadmium ou à l'antimoine aux tubes Geissler à néon. — Essais sur le xénon et le krypton. — Applications spéciales des cathodes. — Lampes à courant alternatif.*

Depuis longtemps on a recherché des lampes au néon, et d'une façon générale des lampes à gaz rares, pouvant fonctionner à basse tension, c'est-à-dire s'alimentant par un courant de 110 à 220 V.

Or la chute cathodique de potentiel étant de l'ordre de 150 à 200 V dans un gaz tel que le néon. Il est impossible de faire marcher une lampe sous une tension inférieure à 150 V.

*Le problème consiste à réduire la chute cathodique de potentiel.*

## 1<sup>re</sup> SOLUTION. — LAMPE AMÉRICAINE

On sait qu'un filament porté à l'incandescence émet facilement des électrons. Si l'on fait jouer à ce filament le rôle de cathode, la chute cathodique est peu importante. M. Maurice Leblanc, dans son article sur la lampe à basse tension de la Cooper Hewitt Américaine, cite 25 V.

Il faut donc pour réaliser cette lampe prévoir un circuit de chauffage qui doit au préalable porter le filament à l'incandescence. Ceci est un premier inconvénient, car il nécessite un appareillage spécial.

Il faut, de plus, l'appareillage normal analogue à celui d'une lampe à vapeur de mercure, afin de pouvoir donner une surtension nécessaire à l'ionisation du tube.

Enfin les ions positifs qui viennent frapper le filament de tungstène constituant la cathode ont tendance à détruire rapidement ce fila-

---

(1) Communication présentée à la séance du 22 février 1930 de la 2<sup>e</sup> Section de la Société Française des Electriciens, sous la présidence de M. DARMOIS.

ment ; il faut donc si possible le protéger, avec une grille par exemple.

Quel que soit ce moyen de protection, ce filament de tungstène qui ne constitue pas une cathode régénérable a inévitablement une longévité limitée.

Telles sont les caractéristiques de la lampe à basse tension fabriquée par la Cooper Hewitt Américaine.

## 2° SOLUTION

L'idée directrice de cette seconde solution est la suivante :

Pourquoi n'existerait-il pas d'autres métaux ou alliages, autres que le mercure, et qui donneraient, comme ce dernier, naissance à une tache cathodique, sans que la tension de vapeur de ces métaux ou alliages soit suffisante pour étouffer le spectre du gaz rare constituant l'atmosphère du tube ?

C'est dans cette voie que j'ai recherché et que j'ai pu arriver à un résultat.

Précédemment il avait été introduit du gaz rare et en particulier du néon dans des lampes à vapeur de mercure. C'est ainsi que M. George a réalisé des brûleurs à mercure dans lesquels le gaz inerte chauffé par un filament, en se dilatant, provoque la rupture de la colonne de mercure, et de ce fait la formation de l'arc.

M. Georges Claude signale l'introduction de néon dans les lampes à vapeur de mercure avec un refroidissement de la cathode par circulation d'eau, afin d'empêcher le passage de mercure dans le corps même de la lampe.

Mais c'est là une solution qui implique un débit de marche réduit et qui semble être plus une curiosité de Laboratoire qu'un appareil répondant à une application industrielle.

J'ai passé en revue tous les métaux qui, à priori, me semblaient susceptibles de donner naissance à une tache cathodique en présence de gaz rares.

J'ai pu observer qu'il existait :

1° Une liaison entre la nature du gaz et le métal de la cathode. C'est ainsi qu'un gaz comme l'argon donne plus facilement que le néon et encore plus facilement que l'hélium, naissance à une tache cathodique.



On peut observer avec une cathode en cadmium un véritable feu d'artifice dans une atmosphère d'argon, et la tache cathodique se forme instantanément à la première surtension donnée à la lampe.

Au contraire, quand l'atmosphère est une atmosphère de néon, si la volatilisation du métal de la cathode a provoqué la formation d'une pellicule métallique sur les parois de la lampe, il s'en suit une difficulté de formation de cette tache.

On la facilite en réalisant, non pas comme dans la lampe à mercure, un condensateur, mais une couronne métallique extérieure réunie au pôle positif de la lampe, et assurant entre la surface du métal

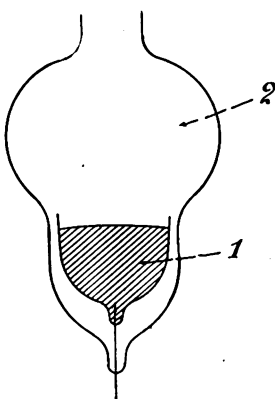


FIG. 1.

de la cathode et le petit condensateur ainsi formé, une effluation qui donne naissance à une myriade de taches cathodiques.

2° Une liaison entre la facilité de formation de la tache et le degré de volatilisation d'un métal. C'est ainsi que des métaux solides comme l'antimoine, par exemple, ou l'arsenic, quoique restant solides, se volatilisent facilement et que la tache cathodique se forme instantanément.

Par contre, on peut observer que certains métaux comme l'étain ou le tellure sont réfractaires à la formation de cette tache.

Il y aurait lieu à mon avis d'établir un rapport qui existe entre la constitution même de l'atome du métal et la formation de la tache.

Il se pourrait que cette tache agisse non seulement par émission électronique par la température à laquelle elle est portée, mais encore par la facilité qu'elle peut avoir à se déséquilibrer et à se rééquilibrer instantanément dans la constitution même de son atome. On peut

en effet observer que la tache cathodique présente le même spectre au point de vue qualitatif que la vapeur du métal, mais qu'en particulier une des raies d'émission se trouve être excitée aux dépens de l'intensité des autres raies. Ceci n'est qu'une simple hypothèse qui est du ressort de nos savants, mais dépasse mon rôle de modeste ingénieur.

Je me permets cependant d'émettre la suggestion qu'il serait intéressant de déplacer les conditions de l'expérience et de suivre par des moyens d'investigation appropriés ce qui se passe dans un atome de métal qui est le siège d'une tache cathodique.

En opérant sous des débits très importants et en cherchant à localiser cette tache cathodique, je crois qu'il serait possible d'obtenir des effets de désintégration intéressants.

#### CONSTITUTION DE LA LAMPE A TACHE CATHODIQUE

a) *Cathode*. — La cathode est constituée conformément au schéma figure 1 par un creuset en verre contenant le métal préalablement fondu. Il y a avantage à traiter préalablement ce creuset sous le vide en le portant à une température telle que le métal soit porté à l'état de fusion et même à une température supérieure. De cette manière on élimine en majorité les impuretés les plus volatiles.

Si on a négligé de les éliminer, leur dégagement peut se produire lors du fonctionnement de la lampe et augmentant ainsi sa force contre-électromotrice provoquer son arrêt.

2 représente l'ampoule de la cathode sur les parois de laquelle vont se condenser les vapeurs émises lors de son fonctionnement.

1 représente le métal fondu dans le creuset.

Il importe en effet d'éviter le transport du métal dans le corps même de la lampe : il faut assurer à la cathode une température moyenne inférieure à celle du corps de la lampe.

Si le métal contient des impuretés, ces impuretés vont se condenser sous forme de sels sur les parois de l'ampoule, et lorsque la tache cathodique commence à se promener sur les parois de l'ampoule, elle provoque la décomposition de ces sels et le dégagement des gaz combinés risque d'amener l'arrêt de la lampe. Il faut donc prendre des précautions lors du pompage pour chauffer convenablement l'ampoule tout en la maintenant à une température inférieure à celle du corps de la lampe afin de provoquer l'entraînement de toutes ces

impuretés par la pompe en évitant leur dépôt sur les parois de l'ampoule cathodique.

La difficulté rencontrée au point de vue réalisation d'une telle cathode est d'obtenir un métal ou un alliage ne brisant pas sa paroi lors de son refroidissement.

Nous nous trouvons en présence de 2<sup>e</sup> solutions possibles :

1<sup>o</sup> Emploi de métaux dont la température de fusion est élevée et qui restent solides lors du fonctionnement de la lampe, je cite parmi eux l'antimoine, l'arsenic, etc.

On peut les réaliser suivant la figure 2 par un cylindre préalablement coulé représenté en 1. Il existe en 2<sup>e</sup> une chambre qui sert de condensation aux impuretés et dans lequel la tache cathodique ne

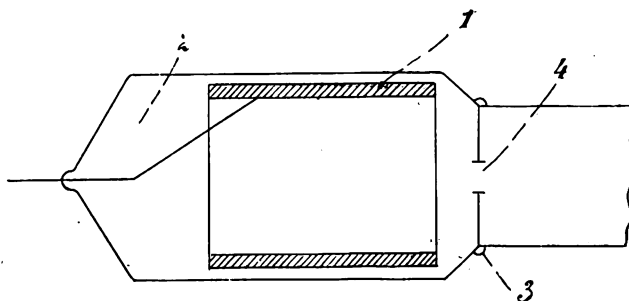


FIG. 2.

va pas se placer, parce que se trouvant trop en arrière du cylindre proprement dit.

On met avantageusement en 3 une double soudure, le courant s'échappant par un orifice 4 qui se trouve porté, de par son étroitesse, à une température plus élevée encore que le corps de la lampe ce qui empêche soit la projection de particules métalliques, soit le transport d'impuretés. L'inconvénient d'un tel procédé consiste en une surface cathodique élevée, ce qui ne facilite pas la formation de la tache cathodique.

Néanmoins, des lampes réalisées pour des conditions de fonctionnement déterminé, donnent d'excellents résultats.

La deuxième solution consiste à utiliser des métaux comme le bismuth, le cadmium, etc...

D'autres métaux tels que les métaux alcalins sembleraient convenir, mais, si on les utilise, le verre est très rapidement réduit après

quelques heures de fonctionnement et la lampe présente une fragilité de parois et un noircissement.

Si on prend du cadmium pur, dans la plupart des cas, en se refroidissant, le cadmium brise les parois du creuset.

On peut arriver à empêcher ce bris en choisissant du Sibor tendre, le verre ordinaire, le sibor dur et le pyrex se brisant presque infailliblement.

Enfin il y a intérêt à réduire le plus possible le diamètre de ce creuset afin de réduire dans les mêmes proportions les efforts de retractions sur les parois de verre. C'est ainsi que des creusets de 11 à 12 mm. de diamètre semblent parfaitement convenir pour réaliser des lampes de grand débit. Il est bon d'augmenter proportionnelle-

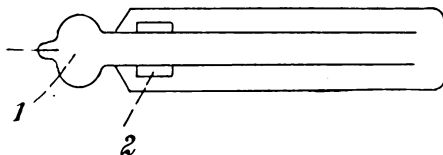


FIG. 3.

ment les dimensions de la cathode afin de ne pas par trop en élever la température.

Il faudra donc chercher un métal ou un alliage qui ne change pas pratiquement de volume en passant de l'état liquide à l'état solide. On sait que le bismuth est un corps qui à l'inverse des autres métaux voit son volume augmenter en passant de l'état liquide à l'état solide. En l'alliant dans des proportions convenables avec le cadmium et en particulier en utilisant l'eutectique, cadmium-bismuth, le creuset conserve toute sa solidité.

Il est à noter que cet eutectique fond à  $140^{\circ}$  et que la tache cathodique a tendance à se former beaucoup plus facilement sur un alliage présentant une température de liquéfaction basse.

b) *Corps de la lampe.* — Le corps de la lampe peut être réalisé en tubes de différentes formes et de différents diamètres. C'est ainsi que pour une différence de potentiel, 60 V, la colonne lumineuse atteindra 90 cm dans un tube de 38 mm et, dans un tube de 24 mm de diamètre, la différence de potentiel aux bornes de la lampe, pour un débit moyen de 3 A, atteindra 140 V pour une longueur éclairante de 140 cm.

Cette lampe suivant la figure 3 pourra être avantageusement réalisée avec 2 tubes concentriques, la cathode se trouvant en 1 et l'anode en 2. On réalisera ainsi sous un volume réduit, une lampe de grande puissance qui pourra se prêter à un emploi dans un projecteur. Dans une lampe au néon en tube de diamètre 11/13, on pourra faire passer un débit pouvant atteindre 8 A.

La lampe ainsi obtenue est particulièrement éclatante et si on la réalise en quartz en forme de spirale, on pourra obtenir une source de volume très réduite pouvant dépenser une énergie de 3 kW.

c) *Anode*. — L'anode sera constituée en fer par exemple en ayant la même forme que les anodes de lampes à vapeur de mercure.

#### CHUTES CATHODIQUES DE POTENTIEL ET CHUTES ANODIQUES

La chute cathodique de potentiel semble varier avec la nature du gaz et avec la nature du métal. Pour l'eutectique cadmium bismuth et l'atmosphère de néon, elle semble être de l'ordre de 8 à 10 V et atteint 12 V pour une cathode constituée par de l'antimoine.

Il est intéressant de comparer cette chute cathodique de potentiel à celle signalée par M. Maurice Leblanc dans sa communication sur la lampe à basse tension américaine. M. Maurice Leblanc signale en effet une chute cathodique de 25 V.

Si on examine le rendement global de la lampe et si on appelle  $V-V'$  la différence de potentiel aux bornes de la lampe,  $C$  sa chute cathodique de potentiel et  $A$  sa chute anodique, le rendement intrinsèque électrique de la lampe c'est-à-dire le rapport entre son énergie transformable en lumière et son énergie effectivement absorbée peut se représenter par la formule :

$$\rho = \frac{(V-V') - (C+A)}{V-V'}$$

On voit donc que le rendement de la lampe à cathode fusible sera supérieur au rendement de la lampe à filament.

La chute anodique de potentiel semble être de 2 à 3 V pour le néon et de 6 à 8 V pour l'argon. Je m'empresse de dire que ces chiffres sont donnés sous toutes réserves, n'ayant pas eu à ma disposition les instruments de laboratoire qu'il est nécessaire de posséder pour se livrer à des mesures précises. Cependant, je tiens à signaler que la chute anodique semble augmenter dans de très grandes proportions

lorsque le gaz est impur, alors que la chute cathodique semble rester constante.

Enfin, avec un remplissage d'argon, un point de l'anode se porte rapidement au rouge sombre et tout le courant semble aboutir à ce point d'impact à température élevée, ce qui semblerait indiquer que pour une atmosphère d'argon, la chute anodique au lieu d'augmenter avec la température comme dans la lampe à vapeur de mercure, semble au contraire diminuer.

*Rapport entre le diamètre de l'ampoule cathodique et le diamètre de la lampe.* — Si nous appelons  $D$  le diamètre de l'ampoule, la surface de refroidissement de la lampe sera de  $\pi D^2$

Dans la lampe proprement dite, si on appelle  $C$  la chute cathodique de potentiel et  $A$  la chute anodique, la chute de potentiel par  $\text{cm}^2$  de surface sera de :

$$\gamma = K \frac{[(V-V') - (C+A)]}{\pi ld}$$

Dans cette formule  $K$  est une constante qui dépend du gaz et de sa pression ;  $l$  est la distance entre anode et cathode, c'est-à-dire la longueur utile de la lampe et  $d$ , le diamètre intérieur du tube.

L'énergie au maximum dépensée en chaleur sera donc par  $\text{cm}^2$  de surface de la lampe :

$$\frac{K [(V-V') - (C+A)]}{\pi ld}$$

Pour que la température du corps de la lampe soit supérieure à la température de l'ampoule, il faut que l'énergie dépensée par  $\text{cm}^2$  de surface dans la lampe soit supérieure à l'énergie à prendre par  $\text{cm}^2$  de surface de l'ampoule ; il faut donc que l'on ait :

$$\frac{D}{d} \geq \frac{C'}{K [(V-V') - (C+A)]}$$

#### CARACTÉRISTIQUE ÉLECTRIQUE DE LA LAMPE

La caractéristique électrique est constituée par la différence de potentiel aux bornes de la lampe en fonction de l'intensité qui circule. La fig. 4 représente cette caractéristique pour une lampe de 60 cm de longueur, diamètre intérieur 34 mm, cathode en antimoine, anode en fer.

Nous constatons que le courant commence à passer pour une certaine valeur  $i_1$ . A ce courant  $i_1$  qui se chiffre en milliampères correspond une différence de potentiel  $(V-V')_1$  correspondant au potentiel d'ionisation de la lampe.

Lorsque  $i$  croît jusqu'à une certaine valeur,  $i_2$ , le potentiel décroît jusqu'à une valeur d'environ 380 V  $(V-V')_2$  pour laquelle nous avons formation de la tache cathodique. D'où diminution brutale de la chute cathodique de potentiel et diminution dans le rapport sensiblement de 1 à 3 de la chute de tension dans la colonne positive. A partir de ce

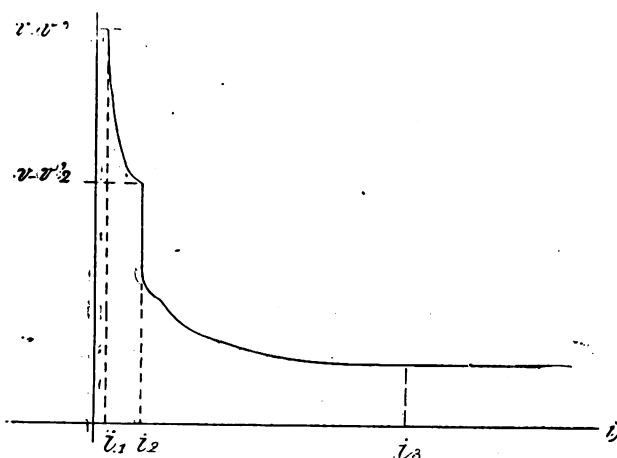


FIG. 4.

point, la courbe présente sa caractéristique de fonctionnement en charge et atteint une valeur de 60 V pour une valeur  $i_3$  du courant de 7 A environ au-dessus de laquelle la chute de potentiel reste sensiblement constante. Telle est l'allure générale de la courbe caractéristique d'une lampe à basse tension à tache cathodique.

#### LAMPES A VAPEURS MÉTALLIQUES

Supposons que nous ayons placé comme cathode un métal tel que le cadmium qui pour des débits de l'ordre de 3, 4 et 5 A ne présente pas de tension de vapeur appréciable.

Si nous poussons la lampe, la température de la cathode s'élève et le métal prend une tension de vapeur correspondant à la température la plus basse d'un point de la lampe. Nous avons vu que par consé-

truction l'ampoule cathodique est, de par sa surface de refroidissement, destinée à assurer cette limite inférieure à la température de la lampe.

Si le débit est suffisant pour que cette température de l'ampoule corresponde à une tension de vapeur du métal, la vapeur du métal va gagner le corps de la lampe proprement dit et le spectre de la vapeur métallique étouffera celui du gaz rare.

J'ai ainsi réalisé des lampes à vapeur de cadmium et des lampes à amalgame de cadmium ainsi qu'amalgame cadmium et lithium. On obtient de cette manière des lampes présentant des applications à la spectroscopie, à la photographie, aux primes de vues cinématographiques et à l'actino-thérapie.

#### CHOIX DU GAZ RARE DANS LA LAMPE A VAPEUR MÉTALLIQUE

Si nous comparons deux tubes à gaz rares de conformité identique, un au néon, l'autre à l'argon, nous constatons que le tube au néon suit une loi assez précise que M. Maurice Leblanc a d'ailleurs signalée au sujet des lampes américaines au néon à basse tension, le produit du rayon du tube par le gradient de potentiel serait constant et de l'ordre de 4,20. En ce qui concerne le tube à l'argon, il n'y a pas de constance et ce produit, lorsque le diamètre du tube diminue, diminue lui-même.

Il est à noter que pour un tube de 9 à 11 mm de diamètre, la conductibilité de ce tube sous l'argon à une pression de 5 mm environ est à 10 pour 100 près la même que celui du tube à l'atmosphère duquel sont venus s'ajouter les vapeurs de cadmium. C'est ainsi qu'une lampe au cadmium de diamètre 9/11 mm et de 50 cm de longueur entre cathode et anode, remplie préalablement d'argon purifié à une pression de 5 mm, fonctionne sous 65 V de différence de potentiel aux bornes, avec 7 A de débit après avoir démarré sur l'atmosphère d'argon à une tension de 69 V.

La lampe à amalgame de cadmium doit être réalisée avec un amalgame très faible en teneur de mercure, sinon le mercure se vaporise immédiatement et la grande valeur qu'a tendance à prendre la tension de mercure, amène au bout de quelques minutes de fonctionnement une valeur contre électro-motrice de l'arc telle que la lampe s'éteint.



Il y a dans ce sens des essais certainement intéressants à faire en vue de réaliser soit des lampes monochromatiques, soit des lampes à spectre de raies aussi nombreuses que possible.

#### TECHNIQUE DE LA FABRICATION

On aura avantage à procéder par les trois étapes suivantes :

1° La lampe est soumise à un courant alternatif d'un débit de 100 à 200 mA, ce qui provoque une élévation de température de l'anode jusqu'au rouge sombre et, de ce fait, l'évacuation des gaz qu'elle contient ;

2° La lampe sera chauffée et soumise à une tension d'alimentation en courant continu suffisante pour assurer son fonctionnement avec les gaz dégagés par la cathode ;

3° Lorsque la lampe est arrivée à se bloquer par absence d'atmosphère gazeuse (l'ampoule cathodique et le corps de la lampe étant chauffés au chalumeau ou au four), on procède à des introductions progressives de gaz rares. Le voltmètre étant monté entre cathode et anode, on voit alors la tension de marche baisser progressivement pour passer par un minimum et avoir tendance à remonter. Dès que ce minimum est atteint et que le voltmètre a tendance à remonter, on arrête l'introduction des gaz et la préparation de la lampe est terminée. A cette conductibilité maxima correspond une pression bien définie.

Cette pression n'est pas constante, mais est liée au diamètre intérieur du tube, c'est ainsi que cette pression optimum est de l'ordre de 1,5 mm pour le diamètre intérieur de 40 mm. Pour le diamètre de 22 à 28 mm elle est de 5 mm et atteint 15 mm pour le diamètre de l'ordre de 10 mm.

Il est à noter que ce résultat semble confirmer l'hypothèse que j'ai formulée il y a fort longtemps déjà et suivant laquelle j'estimais que le rendement luminescent d'un gaz n'est pas fonction de sa pression et qu'il n'existe pas une pression de l'ordre de 1 mm ainsi que l'a avancé par M. Georges CLAUDE pour laquelle le rendement lumineux du néon passe par un maximum d'une façon absolue.

Il existe à mon avis une liaison entre le rendement d'un gaz luminescent et la densité de courant, c'est-à-dire un rapport constant entre le nombre d'électrons qui frappent un nombre déterminé d'atomes du gaz.



d'électrodes pour tubes de Geissler de dimensions particulièrement faibles et d'une chute cathodique de potentiel particulièrement basse.

L'absorption agit fort peu ou est pratiquement nulle parce que, au point où se trouve la tache cathodique, s'il y a volatilisation du métal, il y a de ce fait occlusion du gaz lorsque ces vapeurs métalliques se condensent dans l'ampoule, mais la tache cathodique se déplace incessamment et provoque à nouveau le dégagement du gaz. Ce n'est en définitif qu'une quantité bien définie de l'atmosphère du tube qui se trouve occlue et dégagée à nouveau en permanence.

En outre, étant donné la faible chute cathodique de potentiel les électrodes restent toujours à une température sensiblement inférieure à celle du tube proprement dit.

#### ESSAIS SUR LE XÉNON ET LE KRYPTON

J'ai réalisé avec de telles électrodes un tube au xénon et un tube au mélange de xénon et de néon.. L'avantage du xénon et du krypton est d'avoir une tension d'ionisation très faible et de ce fait de rapprocher dans des proportions importantes la tension d'allumage d'un tube de sa tension de marche au point de vue rendement. Leur spectre ne me semble pas susceptible d'intérêt et la seule curiosité observée est celle du tube au mélange xénon-néon qui présente une teinte rouge rosée de peu d'éclat, mais d'une tonalité particulière.

#### APPLICATIONS SPÉCIALES DES CATHODES

Les cathodes précédemment décrites, peuvent donner lieu à un redresseur de courant présentant un certain intérêt. On voit, en effet, que quel que soit le débit passant dans le redresseur, on ne sera pas conduit comme dans le redresseur à mercure à réaliser de grandes ampoules de condensation en vue d'empêcher la vapeur de mercure de prendre une tension préjudiciable au fonctionnement de l'appareil. Je pense être à même d'ici peu de temps de présenter à la Société française des Electriciens de tels redresseurs.

#### LAMPES A COURANT ALTERNATIF

On peut réaliser des lampes à gaz rares pour courant alternatif analogues aux lampes à vapeur de mercure déjà connues. L'écueil est la nécessité d'avoir un appareil spécial, de mauvais rendement global,

et d'avoir fréquemment des court-circuits entre anodes. La figure 5 représente une lampe spéciale à gaz rares marchant sur l'alternatif.

Un fil de tungstène dépasse le creuset, 1 et 2 constituant alternativement la cathode et l'anode. Un fil 3 réuni à une source de haute fréquence de faible puissance assure l'ionisation préalable du gaz.

A l'allumage les fils de tungstène 3 et 4 lorsqu'ils jouent le rôle d'anode se trouvent portés au rouge blanc. Leur température est suffisante pour qu'ils deviennent à leur tour cathode et de par leur inertie calorifique, l'arc se trouve être maintenu en permanence.

Il est à noter, comme nous l'avons vu, que la chute cathodique de potentiel de tungstène était de 25 V pour un fil de tungstène porté à l'incandescence et qu'elle n'est que de 8 V pour le métal de la cathode.

Il faut donc que la chute de potentiel dans la colonne positive longeant le fil de tungstène soit supérieure à 25 V moins 8 V, c'est-à-dire 17 V.

Dès que la lampe est accrochée, un petit disjoncteur coupe le circuit à haute fréquence d'ionisation.

# AMPÈREMÈTRE DE BARRES ET COURT-CIRCUITMÈTRE <sup>(1)</sup>

par M. VILLIERS

*Ingénieur à l'Ouest-Lumière.*

---

## *Ampèremètre de barres*

Un distributeur doit pouvoir connaître, à tout instant, les courants transportés par ses câbles pour les deux raisons principales suivantes :

1° la connaissance des courants, au moment de la pointe, permet de prévoir exactement les nouveaux câbles à poser pour faire face à la demande de pointe de l'année suivante ;

2° après un accident, nécessitant des réalimentations anormales, il faut pouvoir s'assurer très rapidement qu'elles sont possibles sans soumettre certains tronçons de câbles à des densités de courant dangereuses.

Les réseaux de câbles à haute tension se ramifiant de plus en plus, au fur et à mesure de l'extension de la clientèle, il faut donc pouvoir contrôler les courants dans les postes de coupure toujours plus nombreux.

Les moyens de contrôle utilisables étaient, soit des ampèremètres alimentés par des réducteurs de courants, soit des pinces de Dietz.

Les réducteurs de courant occasionnent des accidents trop graves et trop fréquents pour que l'on ne cherche pas à s'en passer le plus possible et, en fait, ils devraient être strictement réservés à l'équipement des départs de feeders dans les centres importants où l'on peut placer de robustes réducteurs isolés à l'air et résistant bien aux courts-circuits.

Les mesures à la pince de Dietz sont longues et dangereuses et cet instrument ne peut être mis qu'entre les mains de contremaîtres très expérimentés et prudents.

---

(1) Communication présentée en séances de Section de la Société Française des Electriciens, le 11 janvier 1930, devant la 6<sup>e</sup> Section, présidée par M. CELLERIER, et le 30 janvier 1930, devant la 4<sup>e</sup> Section, présidée par M. DAGUERRE.

C'est pourquoi, depuis fort longtemps, nous avons cherché à équiper les postes de coupure isolés avec des ampèremètres à lecture directe, embrochés dans les connexions haute tension.

Nous avons bien trouvé, en Allemagne, des ampèremètres électromagnétiques, suffisamment plats pour pouvoir être montés dans n'importe quelle cellule existante, tout en respectant les distances de sécurité, entre pièces sous tension.

Malheureusement, ces appareils ne pouvaient pas supporter de grosses surintensités. Nous en trouvions toujours une certaine proportion dont l'équipage avait été détruit par des courts-circuits.

Nous avons donc cherché à faire construire un ampèremètre de barres, excessivement plat et qui puisse supporter, sans aucun dommage, les plus grosses surintensités pouvant être mises en jeu dans nos réseaux.

L'ampèremètre que nous présentons répond à ces deux conditions.

Son épaisseur, qui n'excède pas 6 cm, permet de le brancher dans toutes les cellules existantes.

Son équipage mobile ne comporte aucune liaison mécanique et cette particularité lui permet de supporter les plus grosses intensités sans aucune altération.

Le modèle présenté, gradué de 0 à 250 A, convient à des câbles d'une centaine de millimètres carrés de section.

Il a été essayé, sous le contrôle officiel du Laboratoire Central, aux intensités suivantes :

| Courant<br>en ampères | Durée d'essai<br>en secondes |
|-----------------------|------------------------------|
| 10 000 A pendant      | 5 s                          |
| 20 000 A —            | 3 s                          |
| 27 000 A —            | 0,2 s                        |
| 52 000 A —            | 0,2 s                        |

Le certificat délivré par le Laboratoire Central témoigne que l'appareil a subi ces épreuves sans aucune trace d'altération.

Sa précision est de 2 pour 100 soit celle des appareils d'indication.

Bien entendu, il peut être utilisé aussi bien sur la haute que sur la basse tension et il peut être également intéressant pour contrôler des appareils absorbant de très forts courants de démarrage.

La seule difficulté que nous ayons rencontrée dans la réalisation de cet appareil a été de trouver un Constructeur acceptant de l'établir. Nous sommes donc heureux de remercier la Maison Carpentier qui a

bien voulu accepter d'en établir une petite série pour nos besoins personnels. M. Soldadié a su, de la maquette informe que nous lui avons remise, faire un appareil dont les qualités techniques répondent entièrement à nos désirs et nous nous permettons de l'en féliciter, très sincèrement.

### *Court-circuitmètre*

L'appareil représenté par la figure 1 a pour but de permettre à l'exploitant de mesurer la valeur des surintensités qui prennent naissance lors des courts-circuits.

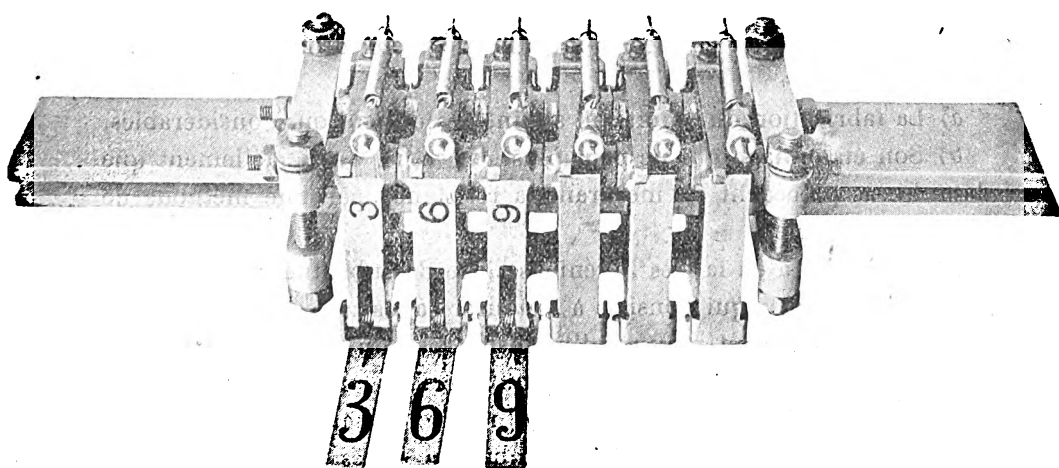


FIG. 1. — Court-circuitmètre.

Il se compose d'une série de volets qui se déclenchent chacun pour une valeur déterminée du courant qui traverse la barre-support.

L'examen des volets déclenchés permet donc de savoir que l'intensité du court-circuit a été comprise entre les limites déterminées par le dernier volet déclenché et le suivant.

Après chaque court-circuit, les volets sont réenclenchés à l'aide d'une perche isolante.

Cet appareil ne peut prétendre à la précision ; les indications qu'il donne sont néanmoins fort précieuses.

## MESURE DE COURANTS CONTINUS

### A INTENSITÉS ÉLEVÉES <sup>(1)</sup>

par M. VASSILLIÈRE-ARLHAC

---

Lorsqu'il s'agit de mesurer des courants de basses ou moyennes intensités, la solution simple est le shunt. Aucune difficulté de réalisation, et les mesures peuvent s'effectuer avec précision.

Lorsque, au contraire, ce sont des intensités élevées atteignant 20 000, 30 000 et même 40 000 A, comme celles que l'on rencontre en électro-chimie ou en électro-métallurgie, deux difficultés apparaissent :

- a) La fabrication du shunt qui atteint des dimensions considérables,
- b) Son étalonnage qui ne peut plus s'effectuer aussi facilement que dans le cas précédent en mesurant la résistance par une méthode de zéro par exemple.

M. PESTARINI a eu la très ingénieuse idée de substituer au shunt un dispositif nouveau qui consiste à entourer la barre parcourue par le courant dont on veut mesurer l'intensité, par un circuit magnétique (circuit primaire) dans lequel on annule le flux engendré par le courant traversant la barre au moyen d'un flux antagoniste réalisé par un bobinage auxiliaire à grand nombre de spires et disposé sur ce circuit primaire.

Si l'on désigne par  $I$  le courant à mesurer, par  $N$  le nombre de spires de l'enroulement auxiliaire secondaire, par  $i$  le courant qu'il est nécessaire de faire passer dans cet enroulement pour neutraliser le flux passant dans le circuit primaire, on a la relation :  $I = Ni$  ;  $N$  et  $i$  sont connus, on en déduit donc  $I$ .

Dans le cas, par exemple, d'un bobinage de 4 000 spires, si le courant nécessaire pour la neutralisation est de 10 A, le courant  $I$  traversant la barre est de 40 000 A.

Pour s'assurer que le flux est annulé dans le circuit magnétique, M. Pestarini se sert d'un petit induit à collecteur monté dans un entrefer ménagé dans le circuit magnétique lui-même.

---

(1) Communication présentée à la séance du 4 mars 1930 de la 3<sup>e</sup> Section de la Société Française des Electriciens, sous la présidence de M. Charles MARIE.



Ce petit induit entraîné au moyen d'un petit moteur extérieur tourne à grande vitesse.

En insérant entre les balais de l'induit un voltmètre, on peut contrôler, lorsque le voltmètre est au zéro, que les ampère-tours résultant sont nuls.

M. Pestarini a ensuite procédé à des essais extrêmement complets afin de rechercher les causes d'erreur possibles et de déterminer l'exactitude que l'on pouvait obtenir dans les mesures.

Une première source d'erreurs est l'hystérésis du fer du circuit magnétique primaire.

a) *Hystérésis fer.*

Ceci est dû à la perméance du circuit magnétique bien que le métal le constituant soit convenablement choisi.

Pour éviter cette cause d'erreur systématique due à la force coercitive du fer, l'inventeur a prévu autour du circuit magnétique un troisième circuit qu'il a désigné sous le nom de tertiaire, disposé parallèlement à l'enroulement principal et parcouru par un courant décroissant vers zéro dont on inverse successivement le sens au moyen d'un petit commutateur tournant.

Ces différentes manœuvres, grâce à l'appareillage étudié, se font très aisément et d'une façon automatique.

b) *Fuites magnétiques.*

Une seconde cause d'erreurs est imputable aux fuites magnétiques.

Nous avons, en effet, admis que le champ inducteur le long du fer dû au secondaire et celui dû au primaire avaient la même répartition, ceci en supposant que les barres du primaire soient parcourues par un courant de valeur égale.

Pratiquement, des fuites importantes proviennent du fait que des barres disposées asymétriquement par rapport à l'ensemble sont parcourues par le courant. Des fuites importantes traversent alors l'induit détecteur entraînant ainsi une erreur importante.

D'autres fuites appartenant à un autre circuit peuvent également réagir sur l'induit détecteur.

Pour pallier à cela, le détecteur est protégé contre les fuites nuisibles par une enveloppe magnétique complètement fermée qui entoure le circuit magnétique entier de l'induit détecteur.

La précision dans les mesures a été réalisée dès les premières mesures avec moins de 1 pour 100 pour des mesures d'intensité atteignant 30 000 A.

Sans aucun doute cette même précision est facilement réalisable pour des mesures de 30 000 et même de 50 000 A.

Un appareil pour la mesure des courants de 30 000 A a été construit pour Alais, Froges et Camargue par les Ateliers J. Carpentier.

M. Gonnard, chef des Services électriques de cette Compagnie, s'est livré à des essais extrêmement intéressants qui permettent d'effectuer des mesures de courant de l'ordre de 20 000 A avec une précision de 0,2 pour 100.

M. Gonnard a de plus imaginé une méthode d'étalonnage des shunts au moyen d'un montage différentiel qui permet d'obtenir pour cet étalonnage une précision de 0,2 et même 0,1 pour 100 en éliminant les erreurs commises par la différence de 2 lectures et même automatiquement l'erreur systématique de l'appareil Pestarini par décalage du zéro du galvanomètre.

#### *Inconvénients des shunts pour intensités élevées*

- a) Obligation d'insérer le shunt dans le circuit primaire, ce qui peut modifier ce dernier d'une manière importante ;
- b) Impossibilité d'insérer le shunt sans interrompre le courant ;
- c) Erreur de l'ampèremètre et erreur du shunt qui s'ajoutent ;
- d) Consommation d'énergie importante ;
- e) Etalonnage difficile ;
- f) Shunt sensible à la température.

#### *Avantages du dispositif de M. Pestarini*

- a) Permet la mesure du courant primaire sans toucher le circuit primaire ;
- b) Peut être monté et démonté autour du circuit primaire sans interrompre le courant primaire.
- c) Son exactitude est ramenée à celle d'un ampèremètre pour courant de l'ordre de 10-50 A, car pour la transformation du courant primaire en courant secondaire équivalent, l'ampèremètre Pestarini n'ajoute qu'une erreur de quelques millièmes.
- d) N'absorbe aucune énergie tant qu'on ne fait pas de mesure et l'énergie temporairement absorbée pendant la mesure est relativement faible (par exemple 600 W pour l'ampèremètre de 30 000 A ;
- e) Son étalonnage est aisé et exact par toute l'échelle ;

f) Ses indications sont indépendantes de la température.

Pour les mesures d'intensité de l'ordre de 10 000 à 15 000 A, M. Pestarini a conçu un ampèremètre direct basé sur le même principe que son ampèremètre différentiel, mais beaucoup plus simple, les champs magnétiques en jeu ne nécessitant pas les mêmes précautions.

*Applications des ampèremètres direct et différentiel de M. Pestarini*

a) Mesure précise et très simple des intensités de courants comprises entre 5 000 et 50 000 A ;

b) Mesure du courant dans les rails, conduites d'eau, canalisations de gaz, paliers de machine parcourus par des courants vagabonds, etc...;

c) Contrôle en atelier du nombre de spires d'une bobine (construction des transformateurs de puissance et de mesure).

L'appareil est alors désigné sous le nom de « spiramètre ».

# OUVRAGES OFFERTS

## A LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS <sup>(1)</sup>

---

### MÉCANIQUE APPLIQUÉE

**Essais, réglage et mise au point des moteurs d'Automobiles et d'Aviation**, par RENÉ BARTIN. Edité par Desforges, Girardot et C<sup>o</sup>, 29, quai des Grands-Augustins, Paris. Un ouvrage broché 25×16,5 cm de 90 pages, année 1930 (Don de l'Editeur).

### ENSEIGNEMENT

**Cours d'Electricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique**, 2<sup>e</sup> Edition 1929, par G. BRULIAT. Edité par Masson et C<sup>o</sup>, 120, boulevard Saint-Germain, Paris 6<sup>e</sup>. Un ouvrage broché 24×16 cm., 740 pages, année 1929 (Don des Editeurs). Prix 70 francs.

**Leçons sur la résistance des fluides non visqueux**, par PAINLEVÉ PAUL, membre de l'Institut. Edité par Gauthier-Villars et Cie, à Paris, 55, quai des Grands-Augustins. Un ouvrage de 25×16,5 cm. broché, 184 pages, année 1930 (Don des éditeurs).

**Leçons sur l'hydrodynamique**, par HENRI VILLAT. Edité par Gauthier Villars et Cie, Paris, 55, quai des Grands-Augustins. Un ouvrage broché 25×16,5 cm. de 296 pages, année 1929 (Don des éditeurs).

**Leçons sur les Conduites**, par CHARLES CAMICHEL. Edité par Gauthier-Villars et Cie, à Paris, 55, quai des Grands-Augustins. Un ouvrage broché 25×16,5 cm. de 102 pages; année 1930 (Don des Editeurs).

### LÉGISLATION

**Les Syndicats financiers**, par TCHERNOFF J. Edité par la librairie du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, à Paris-5<sup>e</sup>. Un ouvrage broché de 23×14,5, 392 pages (Don des Editeurs). Prix 50 francs.

**Des atteintes à la propriété à raison des travaux publics**, par Ch. BLAEVOET. Edité par Marcel Giard, 16, rue Soufflot et 12, rue Toullier, à Paris. Un ouvrage broché 23×14,5, 255 pages, année 1930 (Don des Editeurs). Prix 40 francs.

### CONGRÈS. ACTES OFFICIELS. ANNUAIRE

**Abstracts of papers to be read at World Engénéering Congress Tokiot** octobre-novembre 1929. Un ouvrage de 22×15 cm., broché, 795 pages (Don de World Engineering Congress de Tokio).

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens, 14, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff, de 14 à 18 h., tous les jours sauf le dimanche.

## BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

---

### TRANSMISSION PAR ONDES

**La Télégraphie sans fil, la Téléphonie sans fil**, par MM. PETIT, Ingénieur des Télégraphes et BOUTHILLON, Ingénieur en chef des Télégraphes. Septième édition. Delagrave, Editeur. Un volume 25×17 cm de 424 pages.

Depuis la première édition en 1911 l'ouvrage de MM. Petit et Bouthillon est l'encyclopédie la plus complète qui ait été faite sur l'application des courants de haute fréquence aux communications à distance. Dans la septième édition les auteurs ont complété l'ouvrage par toutes les applications récentes telles que la radio-téléphonie et la transmission des images.

Une partie très intéressante a trait à l'organisation de l'exploitation des réseaux de communication.

Les auteurs ont su rendre leur livre attrayant en évitant les calculs trop abstraits et ce livre qui sera consulté avec fruit par les techniciens intéressera aussi le grand public.

**Le système de télégraphie Baudot et ses applications**, par P. MERCY, Inspecteur des Télégraphes, chargé des cours théoriques et de la surveillance technique des Installations Baudot au Poste Central Télégraphique de Paris, 4<sup>e</sup> édition, 1930. Un volume 14 cm×22 cm de 640 pages, 5 planches et 263 figures. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte. Paris 6<sup>e</sup>. Prix broché : 56 fr.

Ce livre est l'œuvre d'un praticien très exercé et s'adresse plus particulièrement aux élèves dirigeants. Il se divise en 4 parties. Dans la première sont étudiés le principe général du système et les différents organes employés dans une installation simple (double, triple ou quadruple). La seconde partie est consacrée aux réglages des appareils et aux principaux dérangements qui peuvent survenir en service normal. La troisième partie traite des types particuliers d'installations : communications échelonnées, translations tournantes, translations par retransmetteurs, installations pour lignes souterraines, emploi du Baudot sur les lignes sous-marines à l'aide du système Pierre Picard ou par les dispositifs de décharge de M. Lesaffre.

La dernière partie est consacrée aux derniers perfectionnements apportés au système Baudot : transmission automatique, électro-diapason et moteur phonique pour la commande du distributeur, commande du traducteur par alternomoteur synchrone autorégulateur (système Grunenwald), régulateur Doignon-Mendonça-d'Oliveira, système Baudot-Verdan, etc.

En résumé ce volume contient une documentation remarquable, mise tout à fait à jour, sur un système télégraphique dont les applications se développent continuellement.

### RECHERCHES PHYSIQUES

**La structure de la lumière**, par Sir J.-J. THOMSON, traduit par R. FRIE, ingénieur E. S. E., avec une préface de M. A. COTTON, membre de l'Institut. 1929. Une brochure 25 cm×16,5 cm de 50 pages. Editeur : Librairie scientifique Albert Blanchard, 3 et 3 bis, place de la Sorbonne. Prix : 9 fr. (Don de l'Editeur.)

Ce petit volume contient le texte d'une conférence de Sir J. J. Thomson faite en 1925 et celui de plusieurs articles publiés par l'illustre physicien anglais dans « Philosophical Magazine » en 1924 et 1925.

J. J. Thomson entreprend de concilier la théorie corpusculaire de la lumière, due à Newton, et la théorie ondulatoire, issue des travaux de Thomas Young et de Fresnel.

Le traducteur a eu le rare mérite de conserver aux explications de l'auteur toute leur clarté. Aussi le mieux est de citer quelques extraits :

« Dans toutes les formes de la théorie ondulatoire de la lumière, on suppose l'énergie diffusée dans tout l'espace traversé par elle, et non comme dans la théorie de Newton concentrée sur de petits éléments.

— La situation est la suivante : tous les effets optiques conduisent à la théorie ondulatoire, tous les effets électriques à quelque chose qui ressemble à la théorie corpusculaire. Les situations respectives des deux théories sont celles d'un tigre et d'un requin. Chacun de ces animaux représente ce qu'il y a de plus puissant dans son élément, tandis que la valeur de l'un est nulle dans l'élément de l'autre.

— Très peu de temps après avoir commencé à étudier les rayons X, j'arrivais à cette conclusion que leur énergie, et probablement celle de la lumière, est concentrée sur des centres distincts. J'exprimai cette opinion en disant que le front d'une onde lumineuse ressemble à des points brillants sur un fond noir et non à une surface uniformément éclairée. Si l'énergie des rayons X était distribuée d'une façon continue à travers l'espace qu'ils traversent, aucune molécule ne pourrait leur échapper; chacune serait soumise à la même influence; or une seule sur un million de millions est affectée. Ce résultat rend beaucoup plus probable l'hypothèse suivant laquelle l'énergie de la lumière serait concentrée sur des centres entièrement séparés.

— L'idée que je me fais de la lumière émise par un atome ou une molécule est la suivante : Elle consiste en lignes de force distribuées de deux façons. La distribution que nous pouvons appeler corpusculaire et qui correspond aux quanta est constituée par des anneaux formés par des lignes de force fermées. Ces anneaux ou tores avancent perpendiculairement à leur plan avec la vitesse de la lumière. et ce mouvement ne doit modifier ni leur dimension ni leur forme. L'anneau peut vibrer, la période de sa vibration étant égale au temps que met la lumière à parcourir sa circonférence. La fréquence de sa vibration est donc inversement proportionnelle à sa circonférence. Lorsqu'il est projeté hors de l'atome, il vibre violemment et est le point de départ d'un système d'ondes ordinaires de Maxwell. Le tore, constitué comme il est de lignes de force électrique, se déplace avec la vitesse de la lumière. Les ondes de Maxwell possèdent la même vitesse; lorsqu'il parcourt l'espace, il est, par suite, accompagné d'un train d'ondes électriques. L'énergie correspondant à celles-ci est plus faible que celle qui correspond à lui-même. Les ondes précédant le tore déterminent comme nous le verrons sa trajectoire. Ainsi donc, pour nous résumer, la radiation émise par les molécules lumineuses ou les atomes est constituée par un anneau ou noyau, un quantum, possédant presque toute l'énergie; celui-ci est entouré d'une série d'ondes du type de Maxwell, dont la longueur est égale à sa circonférence. »

Les hypothèses qui se dégagent de la lecture de l'opuscule ne constituent pas encore, comme le fait remarquer l'auteur de la préface, M. A. Cotton, une théorie complète et définitive; elles n'en sont pas moins suggestives et fécondes.

**Réflexions sur la mécanique ondulatoire.** Une ancienne théorie dynamique ondulatoire, par E. DE CAMAS, 1929. Une brochure format 22,5 cm x 14 cm, de 98 pages, éditée par la Librairie Scientifique Albert Blanchard, 3 et 3 bis, place de la Sorbonne, à Paris. Prix : 14 francs.

Dans cette brochure, l'auteur retrace des souvenirs anciens, datant d'une trentaine d'années, et constituant, selon sa propre expression, une sorte de mécanique ondulatoire préquantique.

Il rappelle un article qu'il a publié dans la Revue scientifique du 13 décembre 1902, dans lequel il faisait deux hypothèses :

1° Celle de l'existence préalable de masses douées d'inertie, pouvant avoir une origine tourbillonnaire, et représentant la matière;

2° Celle de l'existence de vibrations de périodes déterminées préexistant dans l'éther et se croisant dans tous les sens.

« Admettant que ces vibrations se réfléchissent sur la surface des masses tourbillonnaires douées d'inertie, il en résulte, par le fait de l'interférence des vibrations directes et des vibrations réfléchies, une série de régions nodales et ventrales qui remplacent le chaos primitif. Si les vibrations préexistantes se réfléchissaient

sur la surface des masses en changeant de signe, cette surface était un nœud. Si elles se réfléchissaient sans changer de signe, cette surface était un ventre. »

Par ce début, l'auteur montre la distance qui existe entre ses idées et les théories actuelles.

**Molecular spectra and Molecular structure** (Spectres moléculaires et structure moléculaire). Un volume de  $24 \times 15$  cm de 330 pages. Editeur The Faraday Society.)

Cet ouvrage anglais de 346 pages, 65 figures, donne le compte rendu complet de la discussion générale sur les spectres moléculaires et la structure moléculaire qui a eu lieu à la Société Faraday les 24 et 25 septembre 1929 dans la section de physique de l'Université de Bristol.

Cette discussion à laquelle ont pris part les physiciens les plus éminents d'Europe et d'Amérique comprend trois parties.

La première traite du spectre visible et du spectre ultra-violet.

L'effet Raman fait l'objet de la deuxième partie.

La troisième se rapporte au spectre infra-rouge dans les corps solides, liquides et gazeux.

**Les Méthodes nouvelles en Analyse quantique** (Mécanique quantique, Mécanique ondulatoire), par Julien PACOTTE, Docteur ès-sciences. Un volume  $25 \times 18$  cm de 135 pages, Librairie scientifique Albert Blanchard, 3 et 3 bis, place de la Sorbonne, Paris 5<sup>e</sup>. Prix : 22 fr.

Cet ouvrage est un essai de synthèse des nombreux mémoires publiés dans la période 1925-1928 sur la mécanique quantique et la mécanique ondulatoire.

La première partie (Origines) expose les principes quantiques en général, la mécanique quantique d'Heisenberg, la théorie des ondes de de Broglie, la mécanique ondulatoire de Schrödinger et les perturbations quantiques.

La seconde partie (Relativité et Statistique) traite de la mécanique ondulatoire et de la mécanique quantique dans l'espace fonctionnel d'Hilbert avec son interprétation statistique.

Ce livre intéressera au plus haut point tous ceux qui veulent se tenir au courant des nouvelles théories de la physique moderne.

## IL Y A TRENTE ANS

---

Réunion ordinaire mensuelle du 6 juin 1900

---

Présidence de M. E. MASCART, Président

M. DE LÉNART présente une nouvelle lampe à arc à courant alternatif imaginée par M. Hackl, de la Maison Ganz et Cie, de Budapest.

Les charbons sont inclinés de  $45^\circ$  sur la verticale de manière à former un angle droit entre eux, d'où une condensation de la lumière dans la zone hémisphérique inférieure. Les lampes fonctionnent sous 30 V et consomment 10 à 16 A ; couplées par 3 sur un réseau de 110 V avec un appareil diviseur de tension, elles ont un rendement commercial de 0,86 W:bd.

M. GEORGES CLAUDE expose « quelques idées nouvelles sur le mécanisme de l'électrolyse par les courants de retour des transmissions ».

Cette remarquable communication résume les résultats de nombreux essais entrepris pendant deux années par l'auteur sur divers réseaux de tramways électriques. Une première conclusion, très rassurante, est que les courants vagabonds dans la terre sont beaucoup plus intenses que les courants, seuls dangereux, qui circulent dans les conduites. Le sol se comporte, d'après M. Claude, comme s'il était constitué par une résistance métallique shuntée par une cuve électrolytique. Si la différence de potentiel entre rails et tuyaux ne dépasse pas 1 V à 1,5 V, dans la région dangereuse, l'attaque reste presque négligeable.

A côté du bon jointage des rails, qui est le remède primordial pour atténuer les effets de l'électrolyse, M. Georges Claude préconise le moyen qui consiste à diminuer les différences de potentiel rails-tuyaux, dans la région dangereuse, par la multiplication de feeders de retour aboutissant en des points assez rapprochés les uns des autres et de l'usine ; dans ces conditions la densité des courants vagabonds à la rentrée est diminuée ; la concentration de ceux-ci étant moindre dans la région dangereuse, ainsi systématiquement agrandie, les différences de potentiel sont atténuées, d'où une diminution, relativement plus forte, des courants dans les conduites.

---

*L'Imprimeur-Gérant : Roger Boqué, Paris*

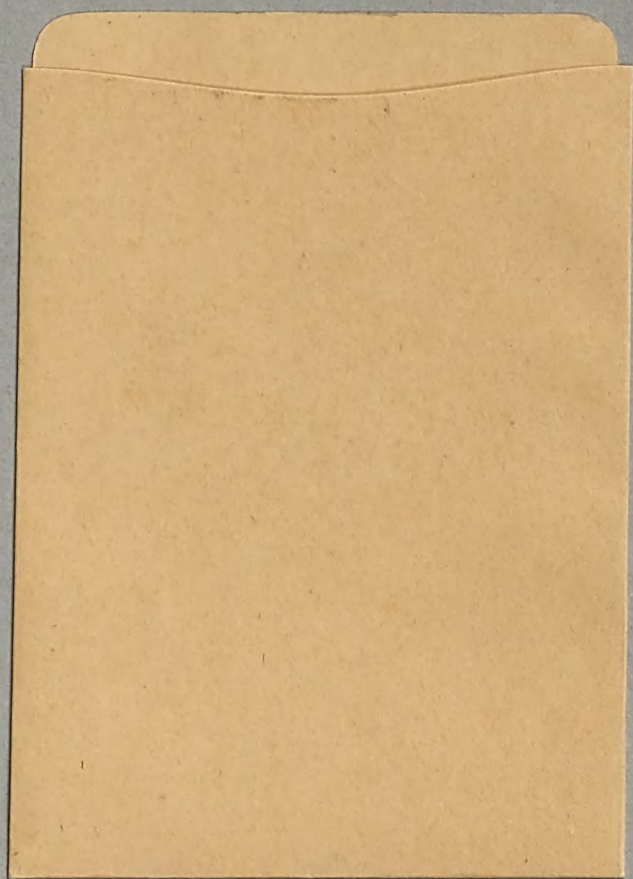












The Ohio State University



3 2435 06228904 6

OHIO STATE UNIVERSITY BOOK DEPOSITORY



8 03 11 28 8 14 001